



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

철강 열연공정 중 가열로 내 냉각롤에 대한
재료의 기계적거동과 고온산화의 열역학적 반응

Mechanical behavior of materials and
thermodynamics of high-temperature oxidation
for water-cooling roll in heating furnace of
hot-rolling process in iron and steel making

2014년 8월

서울대학교 대학원

재료공학부

이 용 준

철강 열연공정 중 가열로 내 냉각롤에 대한
재료의 기계적거동과 고온산화의 열역학적 반응

Mechanical behavior of materials and
thermodynamics of high-temperature oxidation
for water-cooling roll in heating furnace of
hot-rolling process in iron and steel making

지도교수 이 경 우
이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2014년 7월

서울대학교 대학원
재료공학부
이 용 준

이용준의 석사학위논문을 인준함
2014년 7월

위 원 장 황 농 문 (인)

부 위 원 장 이 경 우 (인)

위 원 한 홍 남 (인)

초 록

본 연구는 철강 열연공정 중 가열로 내부에 있는 수냉식 냉각롤에 대하여 재료의 기계적 거동을 분석하고, 롤표면의 고온산화를 열역학적인 관점에서 접근하여 최적사용조건을 수식화하는 것을 목적으로 한다.

첫 번째 연구부분인 재료의 기계적 거동 분석은 가열로의 높은 온도조건과 수냉식 냉각롤의 온도차이를 고려하여 유체역학 및 열전달 적용원리를 수치적으로 계산하고, 온도조건을 고려한 재료의 기계적 물성치와 압하응력 및 열응력계산을 수행한다. 우선 롤내부의 3가지 다른 재질에 대해 온도별 물성치를 분석한다. 다음은 롤의 설계구조를 파악하여 응력전달구간과 지지점을 분석하고, Load Cell을 이용하여 하중을 측정한다. 이를 통해 SFD(Shear Force Diagram)와 BMD(Bending Moment Diagram)를 표현하고 단면계수(Section Modulus)를 고려하여 최대굽힘응력(Maximum Bending Stress)을 도출한다. 그 후 롤에서 파단이 발생하는 롤표면 재질에 대하여 피로강도를 계산하고 ASME(American Society of Mechanical Engineers)의 코드를 기준으로 한 설계허용응력을 계산한다. 마지막으로 열화상카메라로 가열로 내부 온도분포(Profile)와 롤표면의 온도를 측정하고, 수냉식 냉각롤의 냉각라인에 센서를 부착하여 유입되고 토출되는 냉각수의 양과 온도를 측정한다. 이러한 측정치를 바탕으로 열전달량(heat flux), Prandtl Number, Sutherland equation의 온도별 점성도출, Reynolds number, Nusselt Number, 열저항, 열전도도, Fourier law를 고려하여 롤 내부의 구간별 온도분포를 찾아내어 이를 FEM(Finite

Element Method)에 적용한다. 이러한 분석을 통하여 재료의 기계적 거동 연구 부분에서는 물표면에 발생하는 최대응력을 알아내고, 설계적인 관점에서 안전계수(Safety factor)를 도출한다.

두 번째 연구부분은 물표면에 발생하는 고온산화를 열역학적으로 접근하는 것이다. 우선 고온산화의 발생기구를 연구하고 이를 깁스자유에너지(Gibbs Free Energy)식을 이용하여 산소분압에 따른 고온산화에 필요한 구동력(Drive Force), 즉 깁스에너지 차이(ΔG , G 는 Gibbs Free Energy)를 분석한다. 산화 반응($2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$)에 필요한 산소분압을 알아내기 위해 Ellingham Diagram의 Richardson Line을 분석하여 산소분압의 고온산화 영향정도를 도출한다. 또한 열역학계산프로그램인 FactSage를 이용하여 해당 물재질인 합금강에 대하여서도 별도의 계산을 수행한다. 다음은 Fe-O 2상 상평형도(Binary-System Phase Diagram)을 분석하여 온도별 산화스케일 발생영역을 분석하고, 산화스케일 형태(FeO, Fe_3O_4 , Fe_2O_3)에 따른 파괴강도를 비교한다.

세 번째 연구부분은 연구대상인 냉각롤이 가지고 있는 표면파단과 산화스케일생성의 문제를 해결하기 위해 TRIZ(Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch, Theory of Inventive Problem Solving)의 기법을 사용하여 경제성을 갖춘 해결안을 도출하고, 이를 실제 조업에 적용을 하여 실험을 수행하고 이에 따른 개선결과를 분석한다.

마지막 연구부분은 본 연구를 바탕으로 모든 가열로 내 냉각물의 응력분석과 적정온도 관리구간을 설정할 수 있도록 롤 설계치수, 압하중, 롤표면온도, 수냉롤 냉각수 유량, 유입과 토출의 온도차이 등을 기호화 하여 수식을 도출한다. 이러한 식을 바탕으로 유사한 공정을 가지고 있는 경우에 단순히 수치만 입력하여 원하는 결과를 얻을 수 있도록 하고자 한다.

주요어 : 수냉롤, 재료의 기계적 거동, 응력계산, 재료열역학, 고온산화,
TRIZ

학 번 : 2010-23195

차 례

초록

차례

그림목록

표목록

1. 서론	1
1.1. 철강 열연공정 중 가열로 내 수냉식 냉각롤의 용도 및 구조	1
1.2. 연구배경 및 목적	4
2. 실험 방법	5
2.1. 냉각롤 재질의 온도별 물성치 분석	6
2.1.1. 냉각롤 Shell의 기계적성질, 열전달률, 열팽창계수 분석	6
2.1.2. 냉각롤 축의 기계적성질, 열전달률, 열팽창계수 분석	9
2.1.3. 냉각롤 수냉파이프의 기계적성질, 열전달률, 열팽창계수 분석	11
2.2. 냉각롤 재료의 기계적 거동 분석	13
2.2.1. 냉각롤의 설계구조 분석	14
2.2.2. 냉각롤의 응력전달구간 및 지지점 분석	15
2.2.3. Load Cell 측정을 통한 전달하중 분석	16

2.2.4. 냉각롤의 SFD(Shear Force Diagram)분석	16
2.2.5. 냉각롤의 BMD(Bending Moment Diagram)분석	18
2.2.6. 냉각롤의 중실축 및 중공축 단면계수(Section Modulus)분석	20
2.2.7. 냉각롤의 최대굽힘응력 도출	22
 2.3. 냉각롤 Shell의 피로강도 및 설계허용응력 계산	24
2.3.1. 냉각롤 Shell의 피로강도 계산	26
2.3.2. 냉각롤 Shell의 설계허용응력계산	31
 2.4. 냉각롤의 열전달, 물질전달 및 열응력 분석	32
2.4.1. 냉각롤 수냉파이프의 유입, 토출 온도 및 유량 분석	33
2.4.2. 열화상카메라 활용 냉각롤 파단표면 온도 분석	34
2.4.3. 냉각롤 수냉파이프 통과 냉각수의 열유속(Heat Flux)분석	35
2.4.4. 냉각롤 수냉파이프에서의 열전달 분석	38
2.4.5. 냉각롤 축에서의 열전달 분석	44
2.4.6. 냉각롤 Shell에서의 열전달 분석	46
2.4.7. 냉각롤 전체의 온도분포 분석	48
2.4.8. FEM을 활용한 냉각롤 Shell의 열응력 분석	49
2.4.9. 냉각롤 Shell의 작용응력 및 설계안전계수 계산	52

2.5. 냉각롤 Shell의 고온산화반응 열역학적 분석	54
2.5.1. 고온산화반응의 발생기구 분석	55
2.5.2. 금속의 산화반응의 깁스자유에너지 분석	56
2.5.3. 금속의 산화반응에 필요한 산소분압분석	57
2.5.4. 달톤의 분압법칙을 활용한 공기 중 산소분압분석	58
2.5.5. 엘링검 도표를 활용한 온도별 산화반응 요구산소분압 분석	59
2.5.6. Fe-O 2상 상태도 분석	61
2.5.7. 철산화물 종류별 파괴강도 분석	62
2.5.8. FactSage를 활용한 Shell의 합금강 성분 온도별 산화반응 분석	63
2.5.9. 냉각롤 Shell 표면 고온산화 주요원인 분석	63
2.6. TRIZ를 활용한 경제적 해결안 분석	64
2.6.1. Su-Field 모델 분석	64
2.6.2. TRIZ 모순 매트릭스 분석	65
2.6.3. TRIZ 40가지 원리 분석	66
2.6.4. TRIZ 자원분석 및 IFR 도출	67
2.6.5. 냉각롤의 고질적 문제해결을 위한 TRIZ해결안 도출	68

3. 결과 및 토의	69
3.1. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 기계적 응력과 열응력 분석결과	69
3.1.1. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 최대굽입응력 계산결과	69
3.1.2. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 열응력 계산결과	69
3.1.3. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 작용응력 계산결과 도출 및 토의	72
3.2. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 설계안전계수 분석결과	73
3.2.1. 냉각롤 Shell 재료의 피로강도 계산결과	73
3.2.2. 냉각롤 Shell 재료의 설계허용강도 계산결과	73
3.2.3. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 설계안전계수 분석결과 도출 및 토의	73
3.3. 냉각롤 개선 전·후 Shell 표면 파단 발생결과 및 토의	74
3.4. 냉각롤 개선 전·후 Shell 표면 고온산화 발생결과 및 토의	74
3.5. 냉각롤에서 기계적 응력 및 열응력을 고려한 일반식 도출	75
4. 결론	80
참고문헌	82
Abstract	84

그림 목록

그림 1 . 가열로에서의 핀치롤(Pinch Roll)과 열간압연	1
그림 2 . 핀치롤(Pinch Roll)의 구조 및 냉각원리	2
그림 3 . 가열로 내 냉각롤의 균열 및 고온산화현상	4
그림 4 . 냉각롤의 롤 Shell부분	6
그림 5 . 냉각롤의 축부분	9
그림 6 . 냉각롤의 수냉파이프 부분	11
그림 7 . 냉각롤의 설계구조 분석	14
그림 8 . 냉각롤의 응력전달구간 및 지지점	15
그림 9 . Test 1의 Shear Force Diagram 분석	16
그림 10 . Test 2의 Shear Force Diagram 분석	17
그림 11 . Test 1의 Bending Moment Diagram 분석	19
그림 12 . Test 2의 Bending Moment Diagram 분석	19
그림 13 . 냉각롤 롤 Shell의 균열발생 모식도	21
그림 14 . 중공축의 구조(D는 외경, d는 내경)	21
그림 15 . Test 1의 Bending Stress 분석	22
그림 16 . Test 2의 Bending Stress 분석	23
그림 17 . 냉각롤의 롤 Shell부분	25
그림 18 . 냉각롤 수냉파이프 유입, 토출 온도 및 유량측정 모식도	33
그림 19 . 냉각롤 열화상카메라 온도측정 모식도	34
그림 20 . 냉각롤 수냉파이프 수냉구간 모식도	35
그림 21 . 냉각롤 온도구간 및 수냉구간 모식도	35

그림 22 . 냉각물 수냉구간과 수냉파이프의 열전달 모식도	38
그림 23 . 냉각물 온도구간 및 수냉구간과 수냉파이프 열전도 모식도	38
그림 24 . 냉각물 축의 열전달 모식도	44
그림 25 . 냉각물 축의 온도구간 및 열전도 모식도	44
그림 26 . 냉각물 Shell의 열전달 모식도	46
그림 27 . 냉각물 Shell의 온도구간 및 열전도 모식도	46
그림 28 . 냉각물 Shell의 온도분포	48
그림 29 . 냉각물 전체의 온도분포	48
그림 30 . 냉각물 Shell FEM 모델링 매싱현황	49
그림 31 . 냉각물 Shell FEM 경계조건	50
그림 32 . 냉각물 Shell 개선 전 온도 분포 단면도	53
그림 33 . 냉각물 Shell 개선 전 열응력 분포 정면도	51
그림 34 . 냉각물 Shell의 개선 전 종합적인 응력 및 설계안전계수 분석	53
그림 35 . 고온산화반응과정의 모식도	55
그림 36 . 엘링검 도표를 활용한 온도별 산화반응 요구산소분압 분석	59
그림 37 . 온도별 산화반응 요구산소분압 및 공기 중 산소분압 분석	60
그림 38 . Fe-O 상태도 분석	61
그림 39 . 내열강 합금성분의 FeO 생성 FactSage 분석	63
그림 40 . Su-Field 분석	64
그림 41 . TRIZ 자원분석 및 IFR 도출	67
그림 42 . 냉각물의 고질적 문제해결을 위한 해결안 도출	68
그림 43 . 냉각물 Shell 개선 후 온도 분포 단면도	70
그림 44 . 냉각물 Shell 개선 후 열응력 분포 정면도	71

표 목록

표 1 . 냉각롤의 구성 및 재질	3
표 2 . 냉각롤 롤 Shell 내열강의 온도별 인장강도, 항복강도 및 연신율	7
표 3 . 냉각롤의 롤 Shell 내열강의 온도별 탄성계수	7
표 4 . 냉각롤의 롤 Shell 내열강의 온도별 포아송비	7
표 5 . 냉각롤 롤 Shell 내열강의 온도별 열전달률	8
표 6 . 냉각롤 롤 Shell 내열강의 온도별 열팽창계수	8
표 7 . 냉각롤 축 초고장력강의 인장강도, 항복강도 및 연신율	9
표 8 . 냉각롤 축 초고장력강의 온도별 열전달률	9
표 9 . 냉각롤 롤 축 초고장력강의 열팽창계수 및 비열	10
표 10 . 냉각롤 수냉파이프 스테인리스강의 인장강도, 항복강도 및 연신율 ..	11
표 11 . 냉각롤 수냉파이프 스테인리스강의 온도별 열전달률	11
표 12 . 냉각롤 수냉파이프 스테인리스강의 열팽창계수 및 비열	12
표 13 . 냉각롤 롤 Shell 재질인 내열강의 680℃에서의 기계적 강도	26
표 14 . 피로강도계산 하중계수 선정	27
표 15 . 피로강도계산 표면처리계수 선정	27
표 16 . 피로강도계산 온도계수 선정	28
표 17 . 피로강도계산 신뢰도계수 선정	28
표 18 . 피로강도계산 치수효과계수 선정	29
표 19 . 피로강도계산 내구한도 선정	29
표 20 . 냉각롤 수냉파이프 유입, 토출 온도 측정결과	33
표 21 . 냉각롤 수냉파이프 유량 및 파이프 내경	33

표 22 . 냉각물 수냉파이프 유량 및 파이프 내경	39
표 23 . 냉각물 축 재질인 초고장력강의 열전도율	45
표 24 . 냉각물 Shell 재질인 내열강의 열전도율	47
표 25 . 냉각물 물 Shell의 응력분석	51
표 26 . 냉각물 물 Shell의 종합적인 응력 및 설계안전계수 분석	51
표 27 . 금속의 산화반응에 필요한 산소분압분석	55
표 28 . 공기 내 산소분압분석	56
표 29 . 냉각물 수냉파이프 유입, 토출 온도 측정결과	60
표 30 . TRIZ 모순 매트릭스 분석	63
표 31 . TRIZ 40가지 원리 분석	61
표 32 . 냉각물 개선 전·후 Shell의 최대급입응력 계산결과	67
표 33 . 냉각물 개선 전·후 Shell의 열응력 계산결과	67
표 34 . 냉각물 개선 전·후 Shell의 작용응력 계산결과	69
표 35 . 냉각물 개선 전·후 Shell의 설계안전계수 분석결과	70

1. 서론

1.1. 철강 열연공정 중 가열로 내 수냉식 냉각롤의 용도 및 구조

철강공 열연정에서 쓰이는 가열로는 Reheating Furnace라고 불리며, 보통 열간압연이 진행되기 전, 압연이 되는 피압연물을 일정한 온도로 올려, 열간압연에 필요한 온도로 맞추어 주는데 사용이 된다. 가열로에서 온도를 높여주는 승온대상은 슬라브(slab) 혹은 스트립(strip)의 형태를 가지게 된다. 가열을 한번에 처리하는 배치(Batch)형이 아니고 연속적인 공정일 경우, 긴 스트립을 처음과 끝, 즉 유입구간과 토출구간에는 기본적으로 압하력을 주어 스트립이 인장력을 유지한 채로 공정이 진행될 수 있는 상황을 만들어 준다. 연속공정 구간이 긴 경우에는 이러한 압하력을 중간 중간에 주어 인장력을 유지하기도 한다.

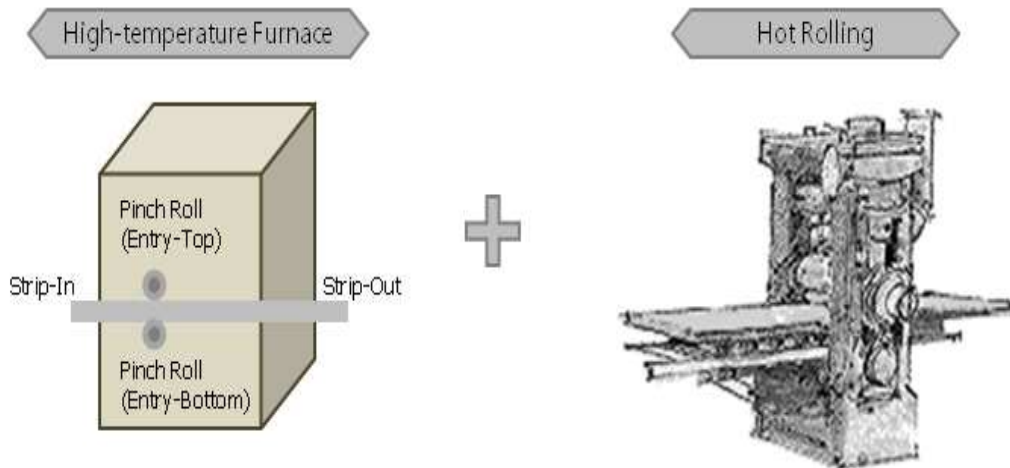


그림 1 . 가열로에서의 핀치롤(Pinch Roll)과 열간압연

이러한 압하력을 주는 롤을 핀치롤(Pinch Roll)이라고 하며, 핀치롤은 압하대상을 기준으로 상부와 하부에 위치하여 압하력을 준다. 그런데 가열로 내에서는 핀치롤이 높은 분위기 온도를 이겨내어야만 하므로, 주위의 높은 온도로부터 받게 되는 열을 계속 방출해주어야만 한다. 따라서 롤 자체에 냉각기능을 갖추어야 하며, 현재 철강산업에서 가장 많이 쓰이고 있는 냉각방식은 수냉(Water-Cooling)방식이다. 그림 2.에서 보는 바와 같이, 핀치롤의 구조는 모터에 연결된 감속기를 통하여 회전토크를 전달받는 축(Shaft, 그림 2.의 3)과 그 내부로 냉각기능을 수행하기 위해 스테인리스 재질의 파이프를 연결하여 파이프 안으로 낮은 온도의 물을 공급한 후, 받은 물에서 받은 열에너지에 해당하는 온도만큼을 토출하는 냉각관(Water-Cooling Pipe) 그리고 실질적으로 스트립의 압하력을 받게 되는 롤표면층이 있으며, 이를 롤 Shell 이라고 한다.

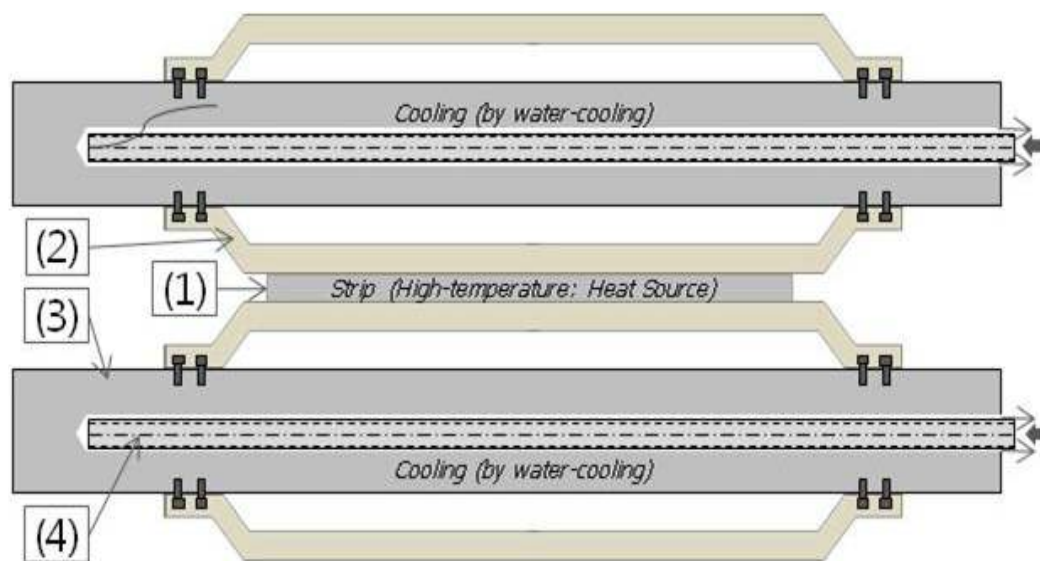


그림 2 . 핀치롤(Pinch Roll)의 구조 및 냉각원리

가열로 내에서 물은 변형을 일으키면 제품의 품질 및 생산에 영향을 주기 때문에, 고온영역에서도 소성변형을 일으키면 안 된다. 따라서 물 Shell의 재질은 내열강(Heat-resistant Steel)이 되며, 축도 하중에 변형이 최소화 되어야 제품의 품질에 악영향을 주지 않으므로, 초고장력강(Ultra High-Strength Steel)을 사용한다. 마지막으로 수냉파이프의 경우 부식방지를 위해 스테인리스강(Stainless Steel)을 사용한다.

구분(그림 2.)	명칭	재질
[1]	스트립	다양한 강종
[2]	물 Shell	내열강
[3]	축	초고장력강
[4]	수냉파이프	스테인리스강

표 1 . 냉각롤의 구성 및 재질

1.2. 연구배경 및 목적

연구대상인 가열로 내 냉각물의 경우, 두 가지 문제점을 가지고 있었다. 첫 번째는 물 Shell에 발생하는 파단인데, 이는 물 Shell이 완전히 파단이 나게 되면 해당공정에 치명적인 문제가 되므로, 표면에 균열(Crack)이 발생하게 되면 더 이상 사용하지 못하는 것으로 판단하고 교체하여 준다. 두 번째는 고온 분위기에서 발생하는 고온산화물(Scale)로 이는 스트립의 표면에 묻어 품질불량으로 이어지게 된다. 결과적으로 물 Shell의 균열이나 고온산화물이 발생하면, 생산을 중지시키고 물을 교체해주어야 한다.

본 연구논문에서는 이러한 두 가지 문제점이 어떻게 발생하는지를 분석하고, 해결안을 모색하여 실제설비에 적용을 한 후 테스트를 실시하여 개선효과를 확인한 내용을 다루고자 한다.

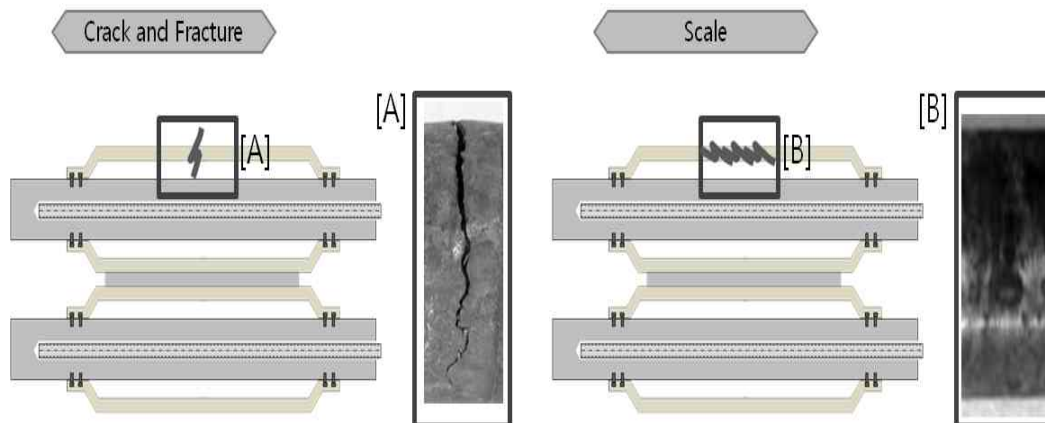


그림 3 . 가열로 내 냉각물의 균열 및 고온산화현상

2. 실험 방법

본 논문에서는 크게 3가지 과정으로 구분된다.

첫 번째 과정은 재료의 기계적 거동, 재료역학, 유체역학, 열전달 및 물질전달, 고온산화에 대한 재료열역학의 재료공학의 이론과 실제조업 중인 설비에 설치한 Load Cell, 열화상카메라, 수냉파이프의 유출입 온도측정 및 유량측정 센서의 실측데이터를 기반으로 가열로 내 냉각물에 발생하는 문제를 분석하고, 해결방향을 도출한다.

두 번째 과정은 TRIZ 기법을 적용하고 경제성을 가지고 산업에 적용 가능한 (feasible) 개선방안을 도출한다.

세 번째 과정은 도출된 개선방안의 이론적 효과를 분석함과 동시에 실제 현장에 적용하여 오랜 기간 동안 테스트를 하고 그 결과를 분석한다. 또한 본 연구를 바탕으로 모든 가열로 내 냉각물의 응력분석과 적정온도 관리구간을 설정할 수 있도록 롤 설계치수, 압하중, 롤표면온도, 수냉롤 냉각수 유량, 유입과 토출의 온도차이 등을 기호화 하여 수식을 도출한다. 이러한 식을 바탕으로 유사한 공정을 가지고 있는 경우에 단순히 수치만 입력하여 원하는 결과를 얻을 수 있도록 하고자 한다.

본 장에서는 두 번째 과정까지의 내용을 서술한다.

2.1. 냉각롤 재질의 온도별 물성치 분석[1][2]

‘1.1. 철강공정 중 가열로 내 수냉식 냉각롤의 용도 및 구조’에서 설명한 바와 같이, 본 연구에서 다룰 재질은 크게 3가지이다. 첫째는 롤 Shell이며, 실제 균열 및 고온산화물이 발생하는 부분이다. 재질은 내열강(Heat-resistant Steel)이다. 둘째는 롤의 축(Shaft)이며 강한 하중을 지탱하기 위하여 초고장력강(Ultra High-strength Steel)이 사용된다. 마지막으로 수냉파이프는 부식을 방지하기 위해 스테인리스강(Stainless Steel)이 사용된다.

2.1.1. 냉각롤 Shell의 기계적성질, 열전달률, 열팽창계수 분석

냉각롤 Shell 재질인 내열강의 온도별 기계적 성질 및 열적 물성치는 다음과 같다.

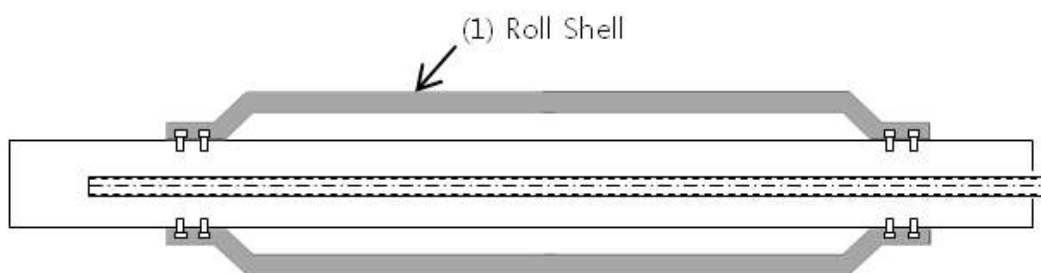


그림 4 . 냉각롤의 롤 Shell부분

	21℃	760℃	871℃	982℃	1093℃	600℃	640℃	680℃
인장강도 (MPa)	580	262	166	103	38	330.85	313.64	296.42
항복강도 (MPa)	303	303	110	62	35	195.66	188.25	180.83
연신율 (%)	20	20	16	42	55	-	-	-

표 2 . 냉각롤 롤 Shell 내열강의 온도별 인장강도, 항복강도 및 연신율

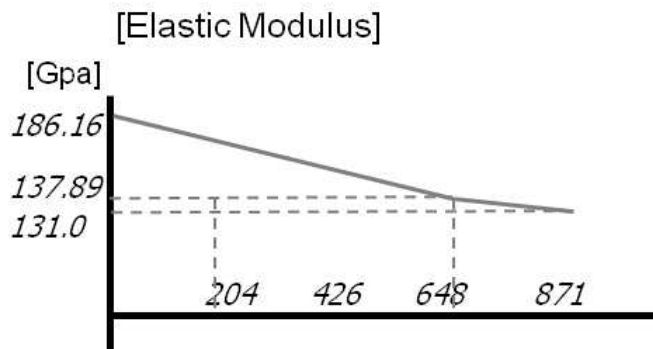


표 3 . 냉각롤의 롤 Shell 내열강의 온도별 탄성계수

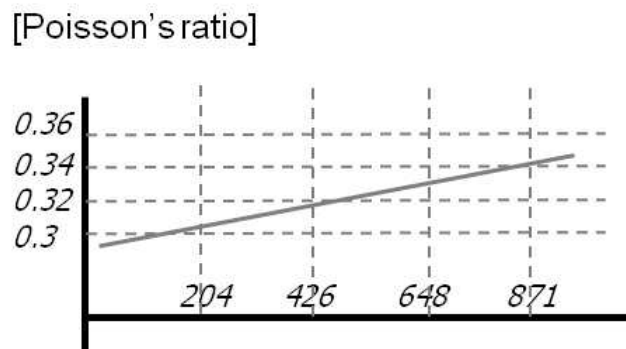


표 4 . 냉각롤의 롤 Shell 내열강의 온도별 포아송비

	100℃	871℃	982℃	600℃	640℃	680℃
열전달률 (Thermal Conductivity) (W/m-k)	13.67	27.18	29.58	21.77	22.54	23.30

표 5 . 냉각물 물 Shell 내열강의 온도별 열전달률

	538℃	650℃	760℃	870℃	980℃	600℃	640℃	680℃
열팽창계수 (Thermal Expansion) (10e-6/℃)	16.9	17.3	17.6	18.0	18.4	17.0	17.2	17.4

표 6 . 냉각물 물 Shell 내열강의 온도별 열팽창계수

2.1.2. 냉각롤 축의 기계적성질, 열전달률, 열팽창계수 분석

냉각롤 축 재질인 초고장력강의 온도별 기계적 성질 및 열적물성치는 다음과 같다.

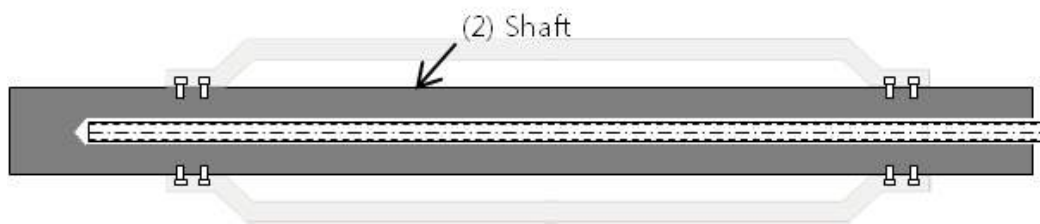


그림 5 . 냉각롤의 축부분

	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
초고장력강	981	883	15

표 7 . 냉각롤 축 초고장력강의 인장강도, 항복강도 및 연신율

	20℃	100℃
열전달률 (Thermal Conductivity) (W/m-k)	16	42.7

표 8 . 냉각롤 축 초고장력강의 온도별 열전달률

	열 팽창계수 (Thermal Expansion) (10e-6/°C)	비열(J/kg-k)
초고장력강	16~17	460~500

표 9 . 냉각물 물 측 초고장력강의 열팽창계수 및 비열

2.1.3. 냉각롤 수냉파이프의 기계적성질, 열전달률, 열팽창계수 분석

냉각롤 수냉파이프 재질인 스테인리스강의 온도별 기계적 성질 및 열적물성치는 다음과 같다.

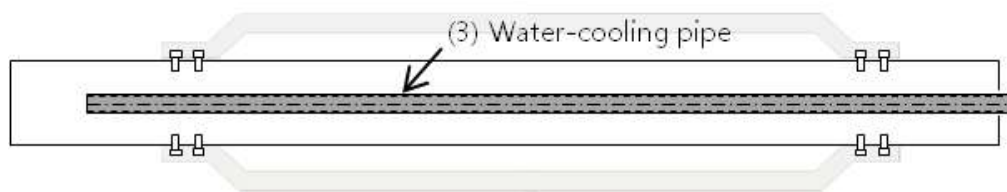


그림 6 . 냉각롤의 수냉파이프 부분

	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
초고장력강	520	205	40

표 10 . 냉각롤 수냉파이프 스테인리스강의 인장강도, 항복강도 및 연신율

	100℃	500℃
열전달률 (Thermal Conductivity) (W/m-k)	16.3	21.5

표 11 . 냉각롤 수냉파이프 스테인리스강의 온도별 열전달률

	열 팽창계수 (Thermal Expansion) (10e-6/℃)	비열(J/kg-k)
초고장력강	17.3~18.7	500~580

표 12 . 냉각물 수냉파이프 스테인리스강의 열팽창계수 및 비열

2.2. 냉각롤 재료의 기계적 거동 분석[3][4][5]

냉각롤 표면에 균열이 발생하는 롤 Shell에 기계적으로 작용하는 응력을 도출하고자 한다. 먼저 냉각롤의 설계구조를 분석하고, 응력전달구간 및 지지점을 분석한다. 그 후 Load Cell을 이용하여 베어링 블록부에서 실제 측정된 데이터를 바탕으로 SFD(Shear Force Diagram)와 BMD(Bending Moment Diagram)를 분석하고, 중실축과 중공축의 단면계수(Section Modulus)를 이용하여 최대굽힘응력(Maximum Bending Stress)을 산출한다. 롤의 최대굽힘응력 계산은 FEM(Finite Element Method)을 이용하여 계산한 방법과 본 연구에서 수행한 방법이 본인의 다른 연구과정에서 5%미만의 결과차이를 가져왔으므로 신뢰도가 높다고 판단되어, 본 연구에서도 수계산으로 계산한다,

2.2.1. 냉각롤의 설계구조 분석

냉각롤의 설계구조는 다음과 같으며, 삼각형으로 표시한 부분은 베어링 중심선(Bearing Center-Line)으로 지지점에 해당되며, 이곳에 Load Cell을 설치하여 하중을 분석한다. 일반적으로 모터의 동력을 감속기로 연결시켜 증가된 회전토크(Torque)를 받아들이는 측을 Drive Side(구동력을 받는 측)라고 하고, 그 반대 측을 Work Side라고 한다.

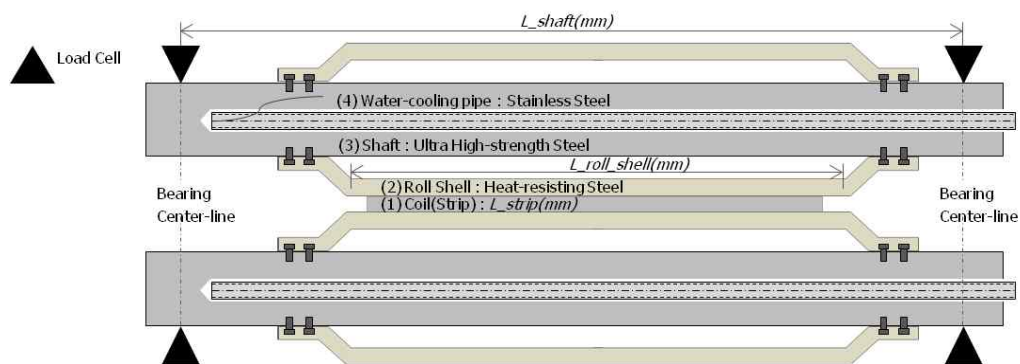


그림 7 . 냉각롤의 설계구조 분석

2.2.2. 냉각롤의 응력전달구간 및 지지점 분석

냉각롤의 응력전달구간 및 지지점은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 스트립의 길이는 제품에 따라 다양하므로 L_{strip} 으로 일반화 하였으며, 단위는 mm를 사용하였다. 마찬가지로 지지점 간 길이는 L_{shaft} 로 일반화 하였으며, 단위는 mm를 사용하였다.

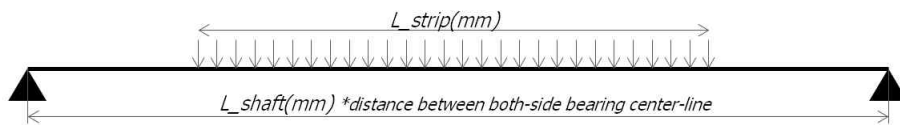


그림 8 . 냉각롤의 응력전달구간 및 지지점

2.2.3. Load Cell 측정을 통한 전달하중 분석

Load Cell을 통한 하중분석결과 최소 50 tonf에서 최대 90 tonf가 측정되었다.
최소인 50 tonf를 Test 1의 값인 Load 1이라고 하고, 최대인 90 tonf를 Test 2의 값인 Load 2라고 설정하였다.

2.2.4. 냉각롤의 SFD(Shear Force Diagram)분석

냉각롤의 SFD(Shear Force Diagram)를 분석하면 다음과 같다.

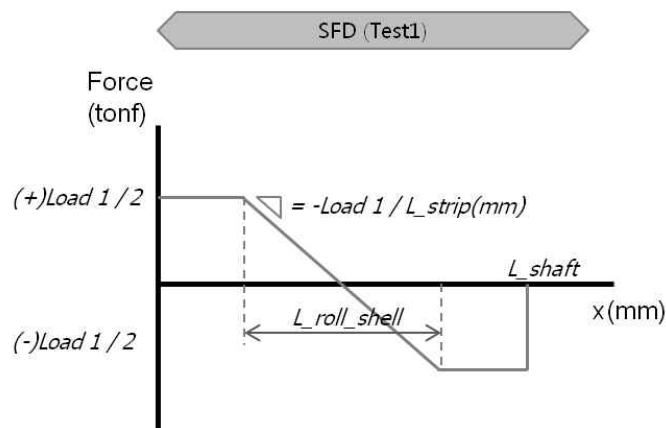


그림 9 . Test 1의 Shear Force Diagram 분석

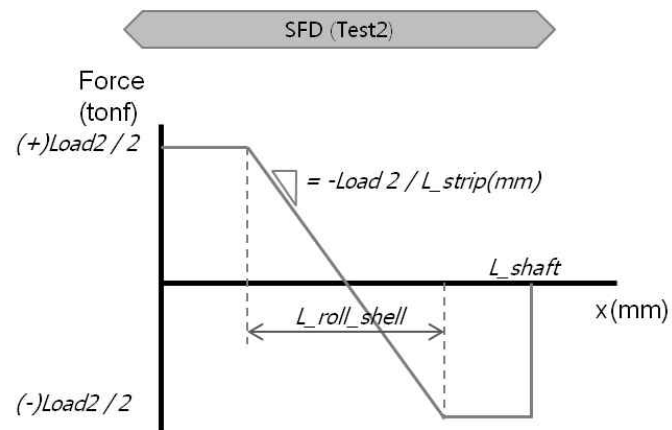


그림 10 . Test 2의 Shear Force Diagram 분석

2.2.5. 냉각롤의 BMD(Bending Moment Diagram)분석

냉각롤의 BMD(Bending Moment Force Diagram)를 분석하면 다음과 같다.

BMD는 SFD를 적분한 개념이므로, 관련식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 아래 그림을 통해 이해할 수 있다. 굽힘응력(Bending Moment)의 단위는 mm와 tonf를 앞의 계산에서 사용하였으므로, tonf-mm가 된다.

[굽힘모멘트 계산식: 하중 1의 경우]

$$Bending\ Moment_1_Max$$

$$= Load_1 \times [(L_shaft - L_roll_shell)/2] + Load_1 \times 1/2 \times 1/2 \times L_roll_shell$$

$$Bending\ Moment_1_roll_shell = Load_1 \times [(L_shaft - L_roll_shell)/2]$$

[굽힘모멘트 계산식: 하중 2의 경우]

$$Bending\ Moment_2_Max$$

$$= Load_2 \times [(L_shaft - L_roll_shell)/2] + Load_2 \times 1/2 \times 1/2 \times L_roll_shell$$

$$Bending\ Moment_2_roll_shell = Load_2 \times [(L_shaft - L_roll_shell)/2]$$

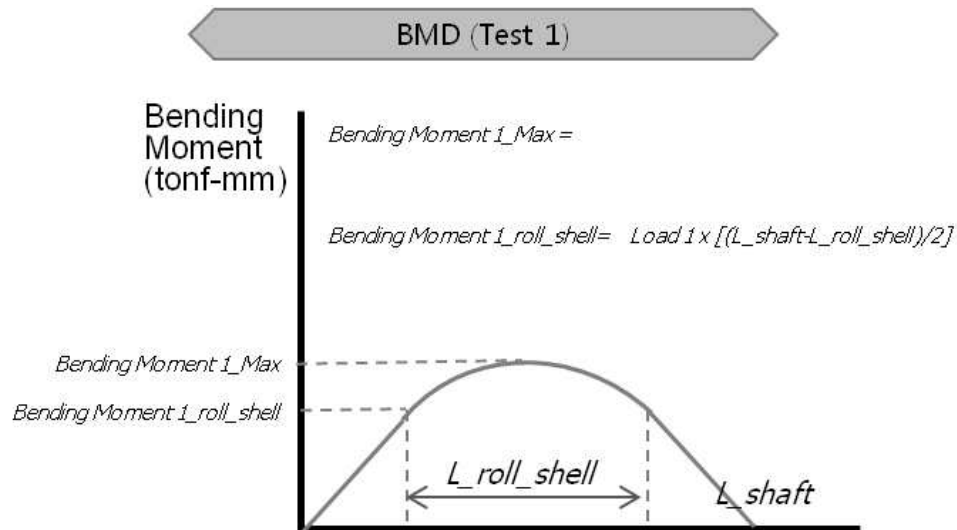


그림 11 . Test 1의 Bending Moment Diagram 분석

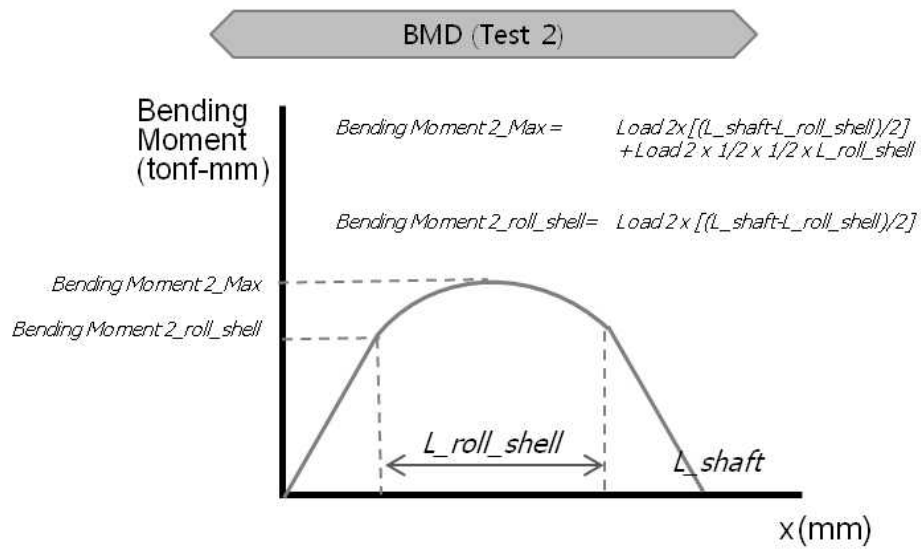


그림 12 . Test 2의 Bending Moment Diagram 분석

2.2.6. 냉각롤의 중실축 및 중공축 단면계수(Section Modulus)분석

축의 경우, 크게 축이 빈틈없이 차있는 것을 중실축이라고 하고, 강도는 유지하면서 경량화를 위해 가운데를 비운 것을 중공축이라고 한다. 대부분 모터토크의 부하 및 부대설비의 지지하중 경감을 위하여 중공축을 많이 사용하고 있으나, 해당 조업 및 설비 조건에 따라 중실축이 사용되기도 한다. 이러한 중실축과 중공축의 단면계수를 구하는 방법은 다음과 같이 다르며, 단면계수는 굽힘응력을 계산하는데 사용되는데, 굽힘모멘트(Bending Moment)를 단면계수(Section Modulus, Z)로 나누어 주면 굽힘응력(Bending Stress)이 계산된다.

[중실축 단면계수 계산식]

$$Section\ Modulus(Z) = \pi \times D^3 / 32$$

[중공축 단면계수 계산식]

$$Section\ Modulus(Z) = \pi \times (D^4 - d^4) / 32D$$

본 연구에서는 균열이 발생하는 부분이 롤 Shell이며, 해당 롤 Shell의 구조는 중공축 구조로 되어 있으므로, 중공축의 단면계수 계산식을 따른다.



그림 13 . 냉각물 롤 Shell의 균열발생 모식도

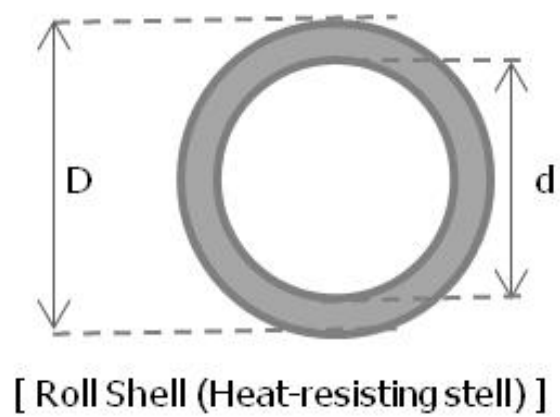


그림 14 . 중공축의 구조(D 는 외경, d 는 내경)

2.2.7. 냉각롤의 최대굽힘응력 도출

앞에서 구한 굽힘모멘트(Bending Moment)를 단면계수(Section Modulus, Z)로 나누어 주면 굽힘응력(Bending Stress)이 계산된다. 결과는 다음과 같으며 단위는 MPa이다.

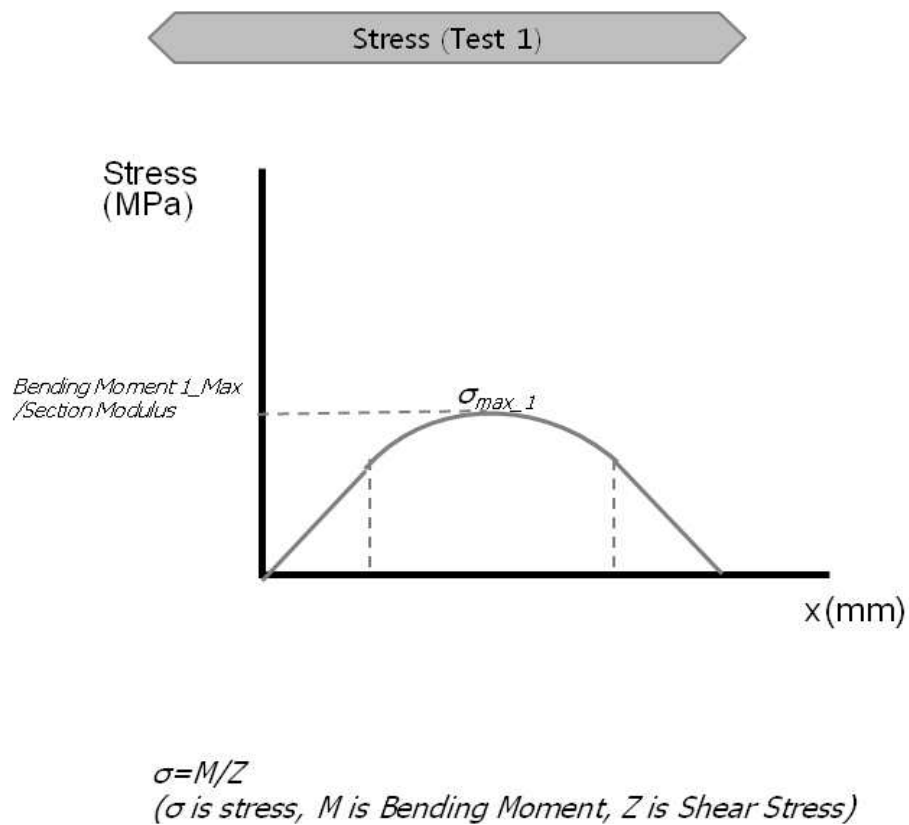


그림 15 . Test 1의 Bending Stress 분석

Stress (Test 2)

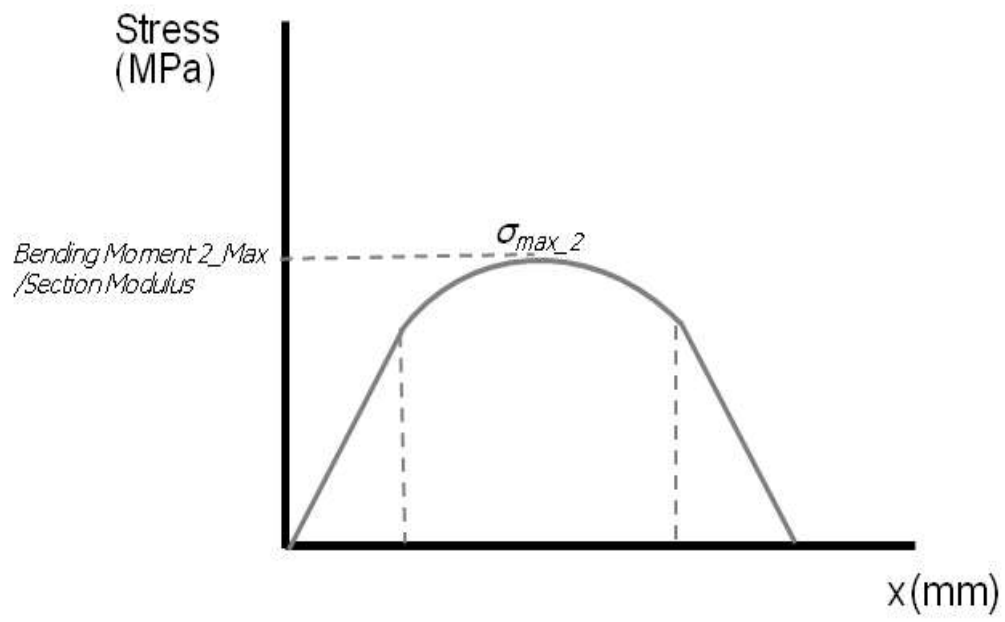


그림 16 . Test 2의 Bending Stress 분석

2.3. 냉각롤 Shell의 피로강도 및 설계허용응력 계산 [6][7][8][9][10][11]

냉각롤 표면에 균열이 발생하는 롤 Shell 재질에 대하여 피로강도 및 설계허용응력을 계산한다.

피로강도는 작동물질을 무한하게 반복적으로 응력을 받아도 작동물질의 사용에 지장이 없는 최대응력을 나타낸다. 따라서 피로강도를 계산하고, 본 연구대상인 냉각롤 Shell에 작용하는 하중이 이 피로강도보다 작을 경우, 냉각롤을 무한에 가깝게 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 다른 부식, 이물질 발생 등의 요소를 제외하고 단순히 응력작용에 대해서만 해당하며, 다른 요소들에 대해서는 별도의 연구가 필요하다. 본 장에서는 응력작용에 관한 내용만을 다룬다.

설계허용응력은 재질의 종류에 따라 다르나 강종의 경우 보통 온도를 고려한 인장강도와 항복강도 등에 적절한 안전계수(Safety Factor)를 적용하여 사용하는데, Unwin의 안전계수 등이 많이 사용된다. 또한 ASME(American Society of Mechanical Engineers)의 설계코드가 많이 사용되는데, 이 때 2차 응력 까지 계산하여 설계허용응력을 높이는 경우가 있다. 본 연구자의 경험으로 철강산업에 이러한 기준을 적용하여 설계허용응력을 높인 경우, 이론적으로는 옳을지 모르나, 실제로 파단이 일어나 대형사고로 이어지는 경우가 많이 있어서 보다 보수적인(Conservative) 입장에서 1차 응력만을 기준으로 하여

상대적으로 낮은 설계허용응력을 적용하였다.

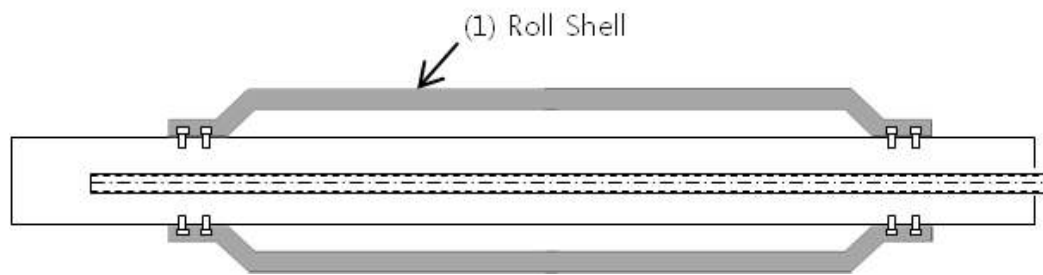


그림 17 . 냉각물의 롤 Shell부분

2.3.1. 냉각롤 Shell의 피로강도 계산

우선 열화상카메라를 활용하여 균열 및 고온산화가 발생하는 롤 Shell 표면의 온도를 측정한다. 평균적으로 680℃가 측정되었고, 이 때의 롤 Shell 재료의 인장강도와 항복강도를 분석하였다.

	인장강도(MPa)	항복강도(MPa))
내열강	296.42	180.83

표 13 . 냉각롤 롤 Shell 재료인 내열강의 680℃에서의 기계적 강도

피로강도(Fatigue Strength)는 하중계수(Loading Factor, C_ℓ), 표면처리계수(Surface Finish Factor, C_f), 온도계수(Temperature Factor, C_t), 신뢰도 계수(Reliability Factor, C_r), 치수효과계수(Size Factor, C_s)와 수정계수가 적용되지 않은 내구한도(Endurance limit, σ_{e0})를 곱하여 계산한다. 즉 식으로 나타내면 다음과 같다.

여기서 σ_e 는 각종 수정계수를 곱하여 준 피로강도가 된다.

[수정계수를 고려한 피로강도 계산식]

$$\sigma_e = C_\ell \times C_f \times C_t \times C_r \times C_s \times \sigma_{e0}$$

수정계수를 각 상황에 맞게 계산이 되어야 하면 다음과 같은 과정으로 이루어진다.

① 하중계수(Loading Factor, C_ℓ)

	굽힘하중	축방향 하중	비틀림 하중
C_ℓ	1.0	0.923 ($\sigma_e \leq 1520$ Mpa), 1 ($\sigma_e > 1520$ Mpa)	1.0

표 14 . 피로강도계산 하중계수 선정

본 연구에서는 굽힘하중이 적용되었으므로, 굽힘하중의 하중계수를 적용하였다.

② 표면처리계수(Surface Finish Factor)

표면처리계수는 다음의 식을 따르며, 여기서 a와 b는 다음의 표와 같다.

[표면처리 계수 계산식]

$C_f = a \cdot \sigma_{ut}^b$ (여기서 σ_{ut} 는 해당 재료의 인장강도)

	표면처리	a(MPa)	b
C_f	연마	1.58	-0.085
	기계가공 및 냉간드로잉	4.58	-0.265
	열간압연	57.7	-0.718
	단조	272	-0.995

표 15 . 피로강도계산 표면처리계수 선정

본 연구에서는 연마된 롤 Shell이 대상으로 계산을 하면 0.973969가 도출되었다.

③ 온도계수(Temperature Factor, C_t)

	$T \leq 450^{\circ}\text{C}$	$450^{\circ}\text{C} < T$
C_t	1.0	$1 - 0.0058(T - 450)$

표 16 . 피로강도계산 온도계수 선정

본 연구에서는 이미 고온에서의 인장강도와 항복강도를 측정한 수치를 사용하므로, 별도로 온도계수를 1이하로 줄 필요가 없다. 따라서 온도계수는 1을 적용하였다.

④ 신뢰도 계수(Reliability Factor, C_r)

	유효성 50(%)	유효성 90(%)	유효성 95(%)	유효성 99(%)	유효성 99.9(%)	유효성 99.99(%)
C_r	1.00	0.90	0.87	0.85	0.75	0.70

표 17 . 피로강도계산 신뢰도계수 선정

본 연구에서는 95%의 유효성을 가질 경우를 고려하여 신뢰성 계수를 0.87로 선정하였다.

⑤ 치수효과계수(Size Factor, C_s)

	$D < 10$ [mm]	$10 \leq D < 50$ [mm]	$50 \leq D$ [mm]
C_s	1.0	$(D / 7.6)^{-0.068}$	$1.85 D^{-0.19}$

표 18 . 피로강도계산 치수효과계수 선정

본 연구에서 냉각롤 롤 Shell은 직경이 50mm 이상으로 $1.85 D^{-0.19}$ 를 적용하여 치수효과계수를 도출하였다.

⑥ 수정계수가 적용되지 않은 내구한도(Endurance limit, σ_{eo})

강종에 대하여 다음과 같은 기준이 적용된다.

	굽힘 피로	인장 피로	비틀림 피로
σ_{eo}	$0.5 \times \sigma_{ut}$ 700 MPa($\sigma_{ut} \geq 1400$ MPa)	$0.45 \times \sigma_{ut}$	$0.29 \times \sigma_{ut}$

(여기서 σ_{ut} 는 해당 재료의 인장강도)

표 19 . 피로강도계산 내구한도 선정

본 연구에서는 굽힘 피로에 대한 기준을 적용하였다.

⑦ 피로강도(Fatigue Strength) 도출

수정계수를 고려한 피로강도 계산식을 이용하여 냉각롤 롤 Shell 재질인 내열강의 경우 74.42 MPa이 도출되었다.

[수정계수를 고려한 피로강도 계산식]

$$\sigma_e = C_\ell \times C_f \times C_t \times C_r \times C_s \times \sigma_{e0}$$

2.3.2. 냉각롤 Shell의 설계허용응력계산

ASME에서 제안한 설계코드를 바탕으로 설계허용응력을 계산하였다. 식은 다음과 같다.

[ASME의 설계허용응력 계산식]

$$\sigma_a = \min(1/3 \times \text{Tensile Strength}, 2/3 \times \text{Yielding Strength})$$

(여기서 σ_a 는 설계허용응력, allowable stress)

본 연구에서는 냉각롤 롤 Shell의 열화상카메라 측정온도에서 얻은 온도를 바탕으로 인장강도와 항복강도를 적용하여, 98.81 MPa을 설계허용응력으로 도출할 수 있었다.

2.4. 냉각롤의 열전달, 물질전달 및 열응력 분석 [12][13][14]

본 장에서는 냉각롤의 각 부위의 온도차로 인해 발생하는 열응력을 분석하고자 한다. 우선 열화상카메라로 가열로 내부 온도분포(Profile)과 롤표면의 온도를 측정하고, 수냉식 냉각롤의 냉각라인에 센서를 부착하여 유입되고 토출되는 냉각수의 양과 온도를 측정한다. 이러한 측정치를 바탕으로 열전달량(heat flux), Prandtl Number, Sutherland equation의 온도별 점성도출, Reynolds number, Nusselt Number, 열저항, 열전도도, Fourier law를 고려하여 롤내부의 구간별 온도분포를 찾아내어 이를 FEM(Finite Element Method)에 적용한다. FEM 수행결과를 토대로 열응력을 분석한다.

2.4.1. 냉각물 수냉파이프의 유입, 토출 온도 및 유량 분석

냉각물 수냉파이프의 유입, 토출 온도 및 유량 분석은 센서를 부착하여 측정하였다. 결과는 아래와 같다.

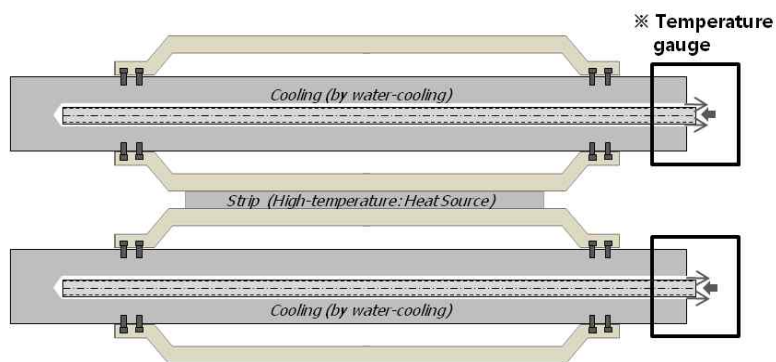


그림 18 . 냉각물 수냉파이프 유입, 토출 온도 및 유량측정 모식도

	유입온도	토출온도
온도(℃)	평균 23	평균 25

표 20 . 냉각물 수냉파이프 유입, 토출 온도 측정결과

	유량(m^3/hr)	파이프 내경(mm)
수냉파이프 측정	1.8	33.4

표 21 . 냉각물 수냉파이프 유량 및 파이프 내경

2.4.2. 열화상카메라 활용 냉각롤 파단표면 온도 분석

열화상카메라를 이용하여 균열 및 파단이 발생하는 냉각롤 롤 Shell의 온도를 측정하였고 평균 680℃가 도출되었다.

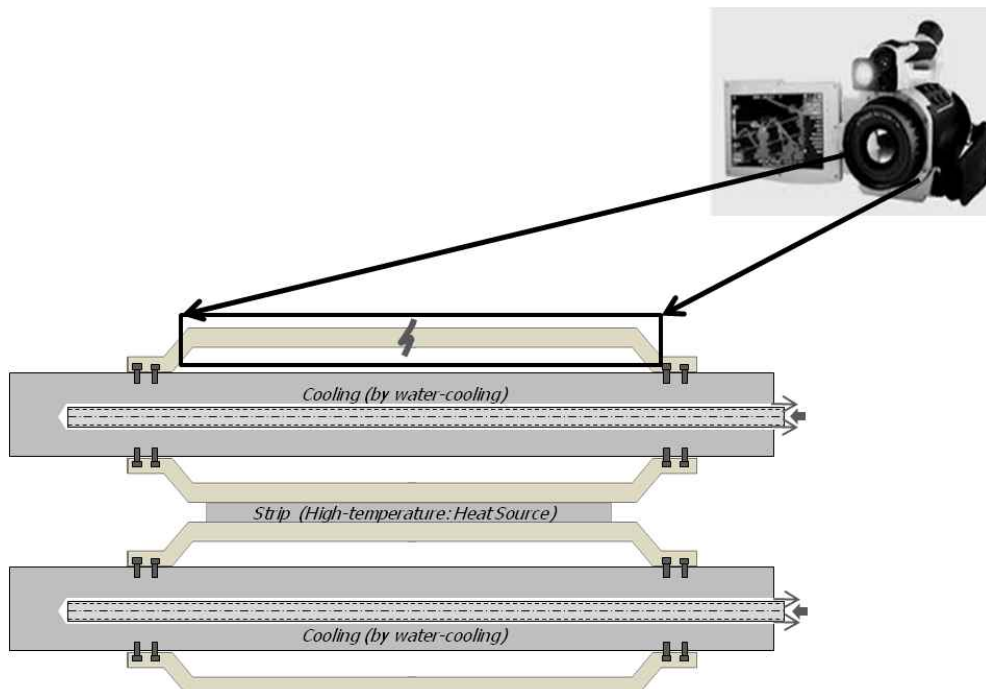


그림 19 . 냉각롤 열화상카메라 온도측정 모식도

2.4.3. 냉각롤 수냉파이프 통과 냉각수의 열유속(Heat Flux)분석

냉각롤 수냉파이프를 통과하는 냉각수의 열유속(Heat Flux)는 다음과 같은 과정으로 분석되었다.

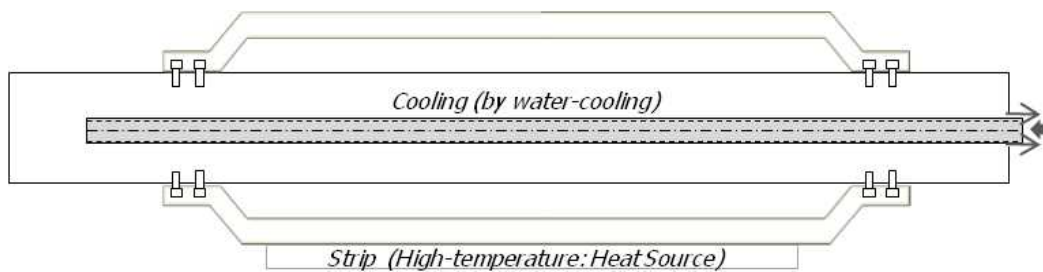


그림 20 . 냉각롤 수냉파이프 수냉구간 모식도

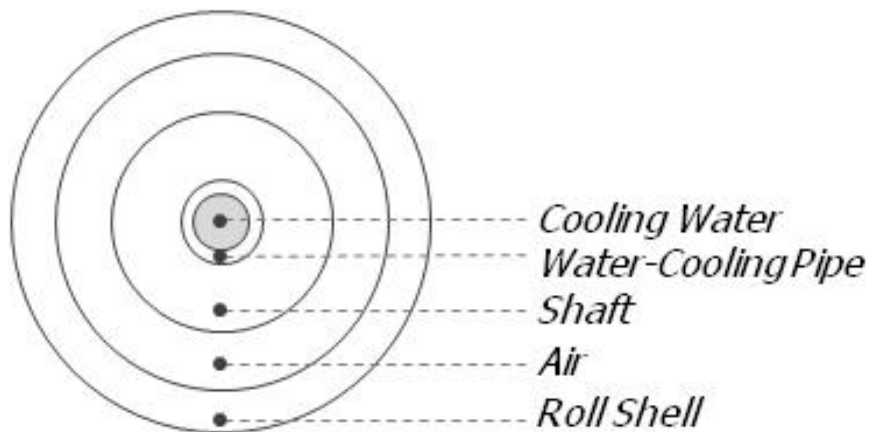


그림 21 . 냉각롤 온도구간 및 수냉구간 모식도

① 측정유량(Flow Rate)분석

센서를 이용한 측정결과 $1.8\text{m}^3/\text{hr}$ 가 도출되었다.

② 냉각수 밀도계산

온도에 따라 냉각수의 밀도가 약간씩 달라지는데, 본 연구에서는 유입온도와 토출온도의 평균치인 24°C 를 기준으로 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

[물의 온도별 밀도 계산식]

Water Density(ρ)

$$= 1,000 - 0.0178 \times \text{abs}(\text{water temperature} - 4^\circ\text{C})^{1.7} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$$= 997.10152 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ at } 24^\circ\text{C}$$

(average temperature of inlet and outlet cooling water)

③ 질량유량(Mass Flow)계산

[질량유량 계산식]

$$\text{Mass Flow} = \text{Flow Rate} \times \text{Water Density at } 24^\circ\text{C}$$

$$= 0.4985508 \text{ kg}/\text{s}$$

④ 비열(Specific Heat) 고려

[비열 고려]

Specific Heat : 4.1802 kJ/kg-k at 24 °C

⑤ 열유속(Heat Flux) 계산

[열유속 계산식]

$$Heat-flux(Q) = c \times m \times \Delta t = 4.168084 \text{ kJ/s}$$

(여기서, c : specific heat, m : mass flow, Δt : temperature gradient)

2.4.4. 냉각롤 수냉파이프에서의 열전달 분석

냉각롤 수냉파이프에서 냉각수와 스테인리스강 파이프 사이의 열전달을 분석하였다. 다음과 과정으로 분석되었다.

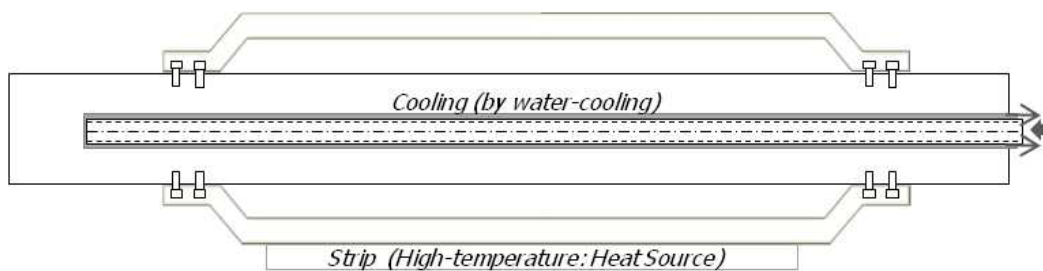


그림 22 . 냉각롤 수냉구간과 수냉파이프의 열전달 모식도

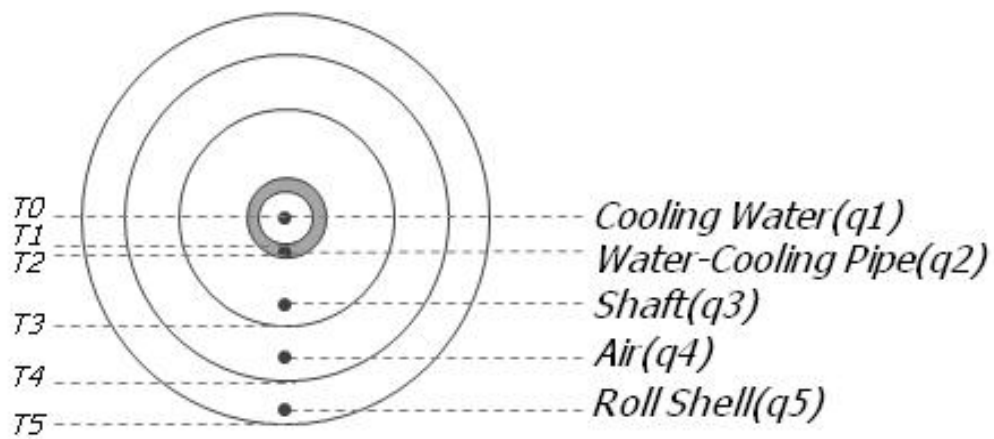


그림 23 . 냉각롤 온도구간 및 수냉구간과 수냉파이프 열전도 모식도

① Prandtl Number분석[15]

기호 Pr 이며 유체의 점성률을 μ , 정압비열을 c_p , 열전도도를 k 로 했을 때 $Pr = \mu \cdot c_p / k$ 라는 무차원수이다. 액체에서 Pr 는 온도와 함께 변화하나 기체에서는 거의 일정한 값을 유지한다. 유체의 동(動)점성률을 $\nu(\mu/\rho)$, 온도 전도도를 $\sigma (=k/\rho c_p)$ 라 하면 $Pr = \nu/\sigma$ 로 표시한다. 여기서, ρ 는 밀도이다.

온도에 따른 분석을 하면 24℃에서 6.304가 도출된다.

	295K	300K	297K(Interpolation결과)
H ₂ O(ℓ) Prandtl Number	6.62	5.83	6.304

표 22 . 냉각물 수냉파이프 유량 및 파이프 내경

② Reynolds Number분석[15]

기호 Re 이며, 흐름 속에 있는 물체의 대표적인 길이를 D , 흐름의 속도를 V , 밀도를 ρ , 점성률을 μ , 동(動)점성률 $\nu = \mu/\rho$ 로 할때 $Re = \rho VD/\mu = VD/\nu$ 로 정의되는 무차원수. 강제대류의 경우 등과 같이 흐름을 특정 짓게 하는 것으로서 매우 중요하다. 일반적으로 흐름은 Re 가 작을 때는 층류(層流)가 되고 클 때는 난류(亂流)가 된다.

본 연구에서는 점성을 온도에 대해 구하여 주기 위하여, Sutherland's equation을 별도로 적용하여 주었다. 계산 과정은 아래와 같으며, 결과적으로 20653.36의 Reynolds Number가 도출되었고 난류성 흐름임을 알 수 있었다.

[냉각물 수냉파이프의 Reynolds Number 계산과정]

-Cooling-water temperature : Average 24 °C

(Inlet : 23 °C / Outlet : 25 °C)

-Velocity : Flow Rate / Channel Area = 1.8m³/hr / ($\pi \times D^2/4$)

= 0.5706728 m/s (D=0.0334m) (by Continuum equation)

- ρ at 24 °C = 997.10152 kg/m³

$-\ln(\mu/\mu_0) = -17.04 - 5.306 \times Z + 7.003 \times Z^2$,

* $\mu_0 = 0.001788 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ at 273K (by Sutherland's equation for viscosity of water)

$-Z = 273 \text{ K} / (273+24 \text{ K}) = 0.919191$, μ at 24 °C = 0.0009202 kg/m · s

-Re(Reynolds number) = 20653.36 (turbulent)

③ Nusselt Number분석[16]

유체와 고체 표면 사이에서 열을 주고받은 비율을 나타내는 숫자로 차원이 없다. 이 수가 클수록 열전도속도에 분자의 운동이 미치는 영향이 작다는 것을 의미한다. 기호 Nu 또는 Nnu로 표시한다. 본 연구에서는 파이프 유동에 가장 일반적으로 사용되는 Colburn equation을 적용하여 Nusselt Number를 계산하였다.

[냉각물 수냉파이프의 Nusselt Number 계산식]

Nusselt Number of Cooling Water

= $0.023 \times Re^{4/5} \times Pr^{1/3}$ (by Colburn equation) = 119.56593

(여기서, Re : Reynolds number, Pr : Prandtl number)

④ 수냉파이프 표면의 열전달률 계산(Pipe Surface Thermal Conductivity, K_f)

수냉파이프의 표면 열전달률은 24℃에서 0.6088 W/m-k로 선정하였다.

⑤ 수냉파이프 표면의 대류열전달계수 (Convective Heat Transfer Coefficient, h)

[냉각물 수냉파이프 표면의 대류열전달계수 계산과정]

$$h = Nu \times k_f / D$$

$$= 119.56593 \times 0.6088 \text{ W/m} \cdot \text{k} \times 0.0334 \text{ m} = 2179.3933 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$$

(여기서, Nu : Nusselt number, k_f : Surface Thermal Conductivity,

D : Water-cooling Channel Diameter [m],

h : Convective Heat Transfer Coefficient)

⑥ 수냉구간의 열저항 계산(Thermal Resistance of Water-cooling Flow Convection)

[수냉구간의 열저항 계산과정]

$$R_{convection} \text{ of Water-cooling} = 1 / (h \times A)$$

$$= 1 / (h \times D \times \pi \times L)$$

$$= 0.002916735279007451 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

(여기서, A : Convection Area, L : Characteristic Length(1.5m))

⑦ 냉각물 수냉파이프 재료인 스테인리스강의

열전도율(Thermal Conductivity) 및 열저항(Thermal Resistance)

[스테인리스강의 열전도율 및 열저항 계산과정]

$$k_{pipe} \text{ at } 24 \text{ }^{\circ}\text{C} = 14.543 \text{ W/m} \cdot \text{k}$$

$$R_{pipe} \text{ at } 24 \text{ }^{\circ}\text{C} = \ln(D_{pipe_out} / D_{pipe_inner}) / (2 \times \pi \times L \times k_{pipe} \text{ at } 24 \text{ }^{\circ}\text{C}) \\ = 0.001345418 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

(여기서, k_{pipe} : Thermal Conductivity of Water-cooling Pipe,

D_{pipe_out} : Outer Pipe Diameter(40.16mm) ,

D_{pipe_inner} : Inner Pipe Diameter(33.4mm))

⑧ Fourier 법칙 적용(Fourier's Law)

[Fourier 법칙 적용과정]

$$q = q1 = q2 = q3 = q4 = q5$$

$q1, q2, q3, q4, q5$ 에 대한 사항은 그림 22.에 설명되어 있다. Fourier의 법칙은 연속되어 있는 구간은 Heat Flux가 모두 같다는 것이고, 이 법칙을 이용하여 구간별 다른 재질에서 나오는 열적특성과 열통과길이(두께)에 의해 온도차가 발생한다. 이러한 원리를 이용하여 온도분포(Profile)을 구할 수 있으며, 이 온도분포를 이용하여 열응력을 계산할 수 있다. q 는 앞서 구한 냉각수의 Heat Flux(Q)와 같다.

⑨ 수냉파이프 구간의 온도분석

계산에 사용되는 T0, T1, T2, T3, T4, T5는 그림 22.에 설명되어 있다.

[수냉파이프 구간의 온도분석 계산과정]

$$q2 = T2 - T1 / (R_{\text{convection of water cooling}} + R_{\text{pipe at } 24\text{ }^{\circ}\text{C}})$$
$$= T2 - 24\text{ }^{\circ}\text{C} / (0.002916735279007451 + 0.001345418\text{ }^{\circ}\text{C/W})$$

$$T2 : 41.76501\text{ }^{\circ}\text{C}$$

(여기서, T1 : Water-cooling Pipe Inner-surface Temperature,
T2 : Water-cooling Pipe Outer-surface Temperature)

2.4.5. 냉각롤 축에서의 열전달 분석

냉각롤 축에서 열전달을 분석하였다. 다음과 과정으로 분석되었다.

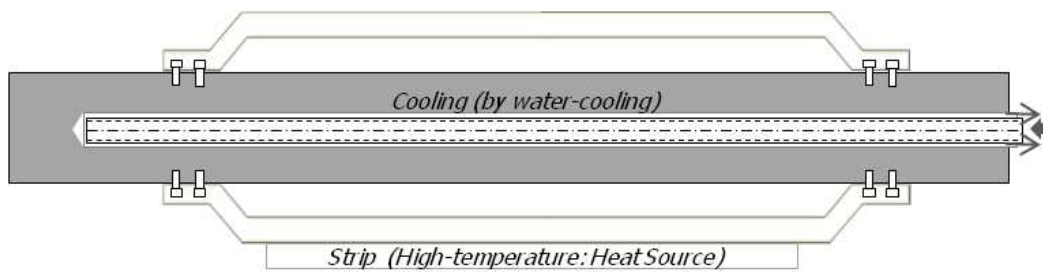


그림 24 . 냉각롤 축의 열전달 모식도

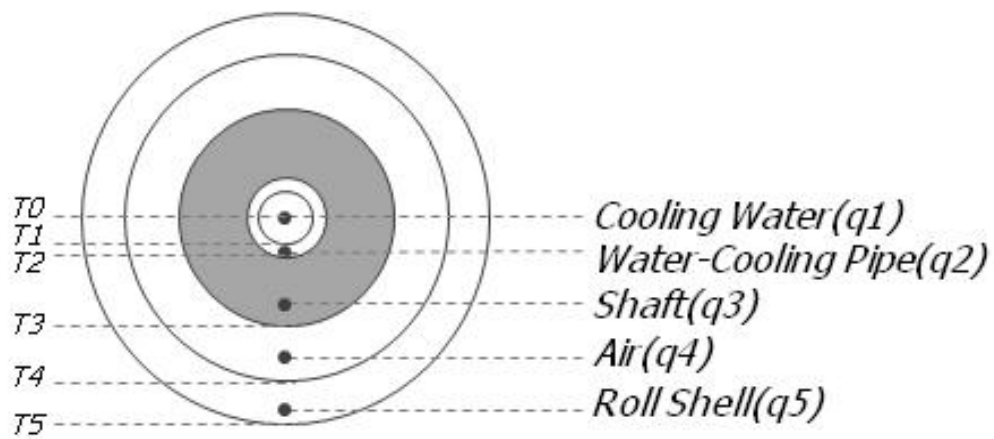


그림 25 . 냉각롤 축의 온도구간 및 열전도 모식도

① 냉각물 축 재료 초고장력강의 온도별 열전도율(Thermal Conductivity) 분석

냉각물 축의 온도는 열전도율을 고려한 온도계산 후, 대략적인 평균온도를 기준으로 열전도율을 반복적으로 수정하면서 산정하였다. 약 55℃에서 열전도율과 축의 평균온도가 일치하였다.

	293K(W/m-k)	373K(W/m-k)	328K(Interpolation결과)
초고장력강	16	42.7	27.68

표 23 . 냉각물 축 재질인 초고장력강의 열전도율

② 냉각물 축 재료 초고장력강의 열저항 분석

[냉각물 축 재료 초고장력강의 열저항 계산과정]

$$R_{shaft} = \ln(D_{shaft_outer} / D_{shaft_inner}) / (2 \times \pi \times L \times k_{shaft})$$

$$= 0.0059604^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

③ 냉각물 축 외측표면의 온도분석

[냉각물 축 표면 온도 계산과정]

$$q = T3 - T1 / (R_{convection\ of\ water\ cooling} + R_{pipe\ at\ 24\ ^{\circ}\text{C}} + R_{shaft})$$

$$= T3 - 24\ ^{\circ}\text{C} / (0.002916735279007451 + 0.001345418 + 0.0059604\ ^{\circ}\text{C}/\text{W})$$

$$T3 : 66.61\ ^{\circ}\text{C}$$

2.4.6. 냉각롤 Shell에서의 열전달 분석

냉각롤 축에서 열전달을 분석하였다. 다음과 과정으로 분석되었다.

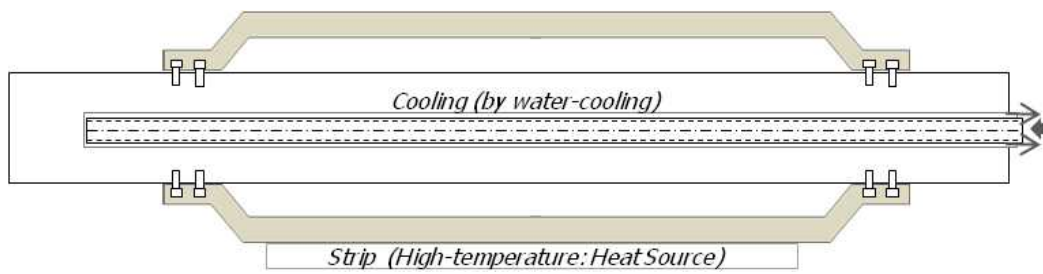


그림 26 . 냉각롤 Shell의 열전달 모식도

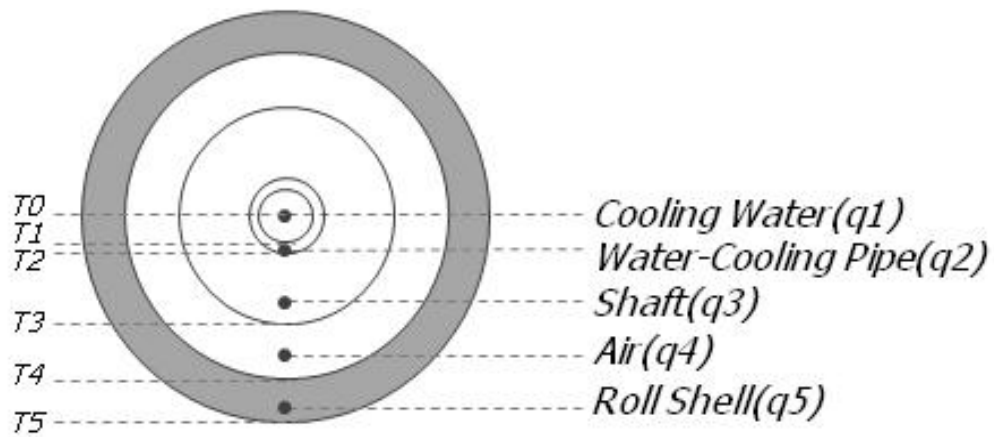


그림 27 . 냉각롤 Shell의 온도구간 및 열전도 모식도

① 냉각롤 Shell 재료 내열강의 온도별 열전도율(Thermal Conductivity) 분석

냉각롤 축의 온도는 열화상카메라로 측정된 680℃에서 열전도율을 산출하였다.

	373K(W/m-k)	1,144K(W/m-k)	953K(Interpolation결과)
내열강	13.67	27.18	23.30

표 24 . 냉각롤 Shell 재질인 내열강의 열전도율

② 냉각롤 Shell 재료 내열강의 열저항 분석

[냉각롤 Shell 재료 내열강의 열저항 계산과정]

$$R_{shell} = thickness / k_{shell} \times contact\ area$$

$$= [(D_{shell_outer} - D_{shell_inner}) / 2] / (k_{shell} \times D_{shell_outer} \times \pi \times L \times wrapping\ angle / 2\pi)$$

③ 냉각롤 축 표면의 온도분석

[냉각롤 Shell 재료 내열강 내측 표면 온도 계산과정]

$$q = T5 - T4 / (R_{shell})$$

$$= 680^{\circ}C - T4 / (0.006432^{\circ}C/W)$$

$$T4 : 653.26^{\circ}C$$

2.4.7. 냉각롤 전체의 온도분포 분석

상기 과정을 종합하면 다음과 같은 냉각롤 전체의 온도분포가 도출된다.

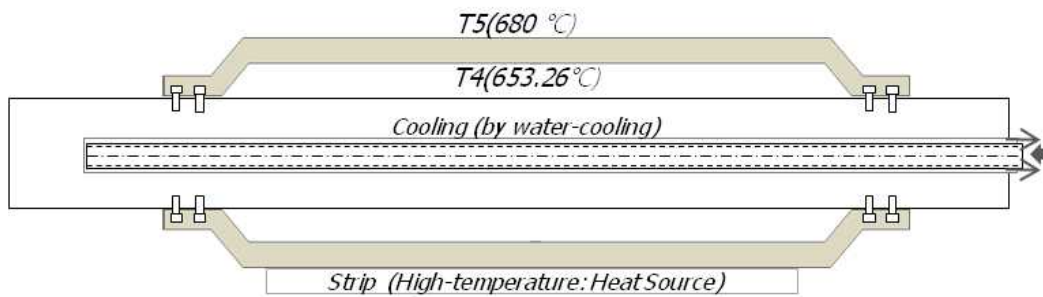


그림 28 . 냉각롤 Shell의 온도분포

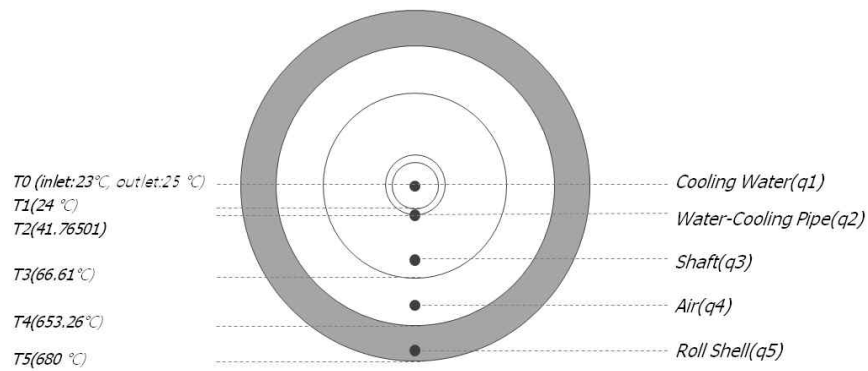


그림 29 . 냉각롤 전체의 온도분포

2.4.8. FEM을 활용한 냉각롤 Shell의 열응력 분석

냉각롤의 온도분포를 FEM(Finite Element Method)의 경계조건(Boundary Condition)으로 설정 후, 열응력을 분석하면 다음과 같다. 본 연구에서는 Siemens NX IDEAS-6 프로그램을 활용하였다. 결과적으로 최대 열응력은 44.7 MPa이 도출되었다. 이는 연강재질에 실험결과와 가장 적중률이 높은 Von-Mises Stress 계산법으로 도출하였다.

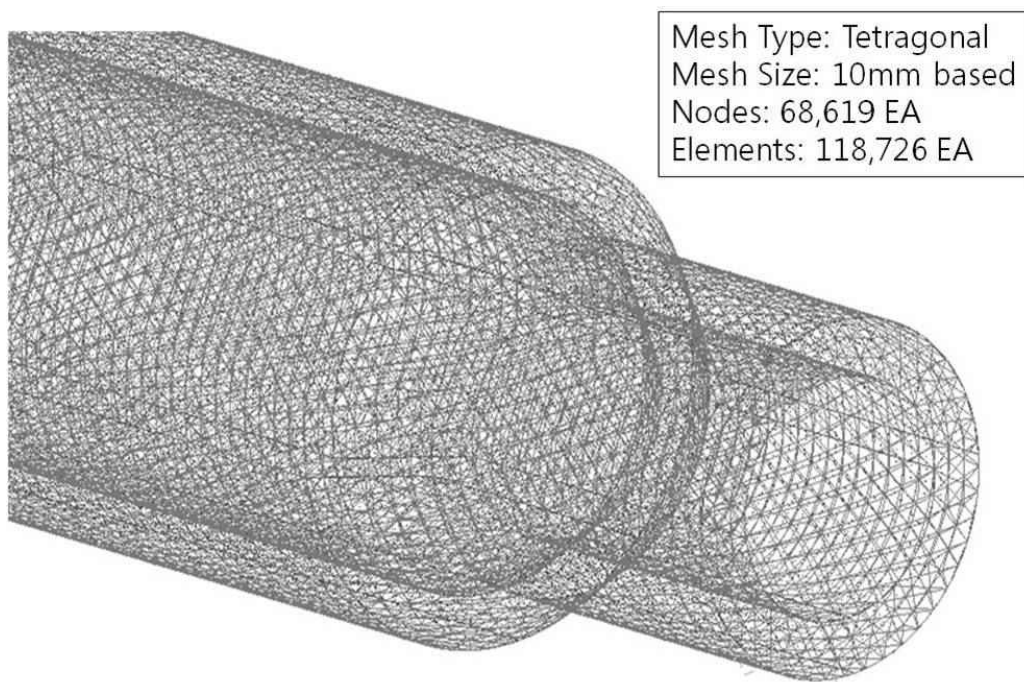


그림 30 . 냉각롤 Shell FEM 모델링 매싱현황

- Roll Shaft Direction: X-Axis
- Outer Shell Surface: High Temperature
- Inner Shell Surface: Low Temperature
- Restraint Condition Sets

Direction Side	Transverse			Rotational		
	X-Axis	Y-Axis	Z-Axis	X-Axis	Y-Axis	Z-Axis
Drive-Side	FIX	FIX	FIX	FIX	FIX	FIX
Work-Side	FREE	FIX	FIX	FIX	FREE	FREE

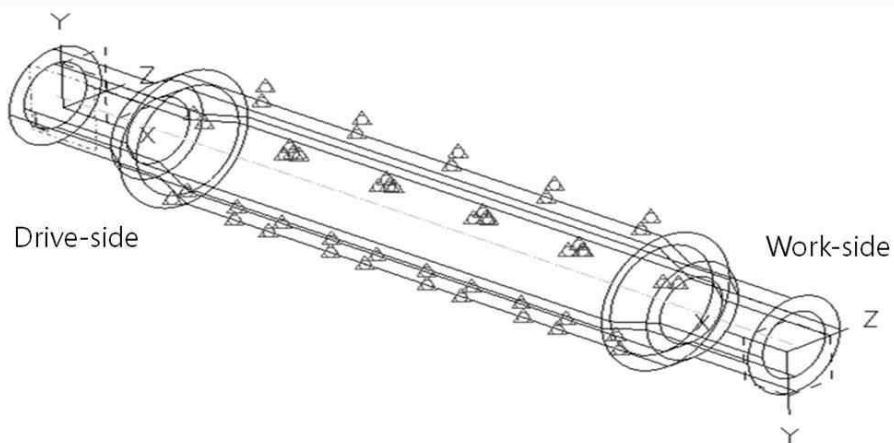


그림 31 . 냉각롤 Shell FEM 경계조건

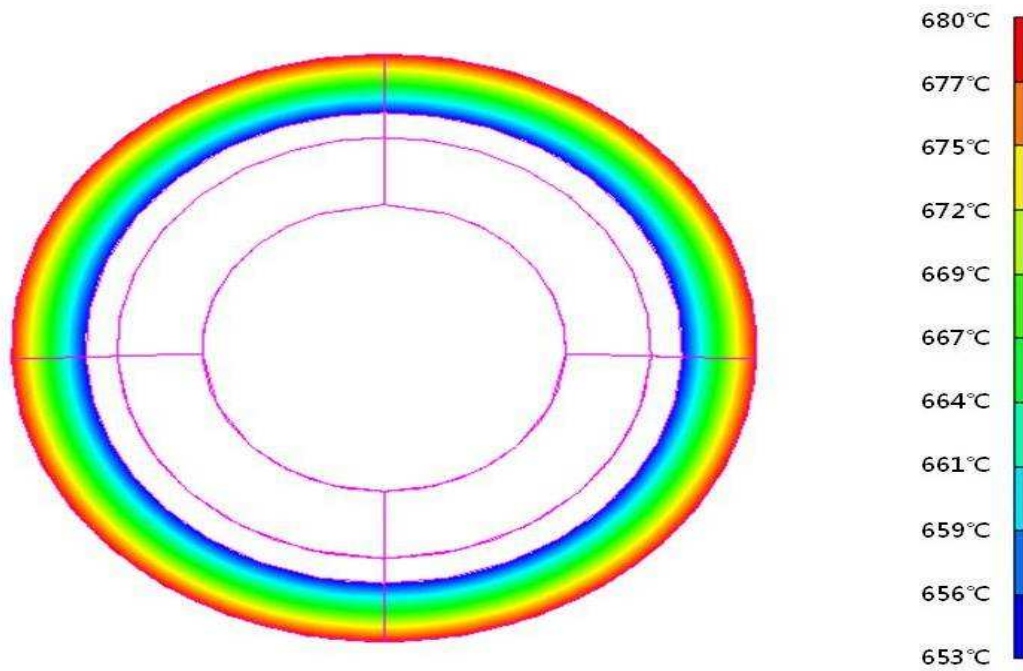


그림 32 . 냉각롤 Shell 개선 전 온도 분포 단면도

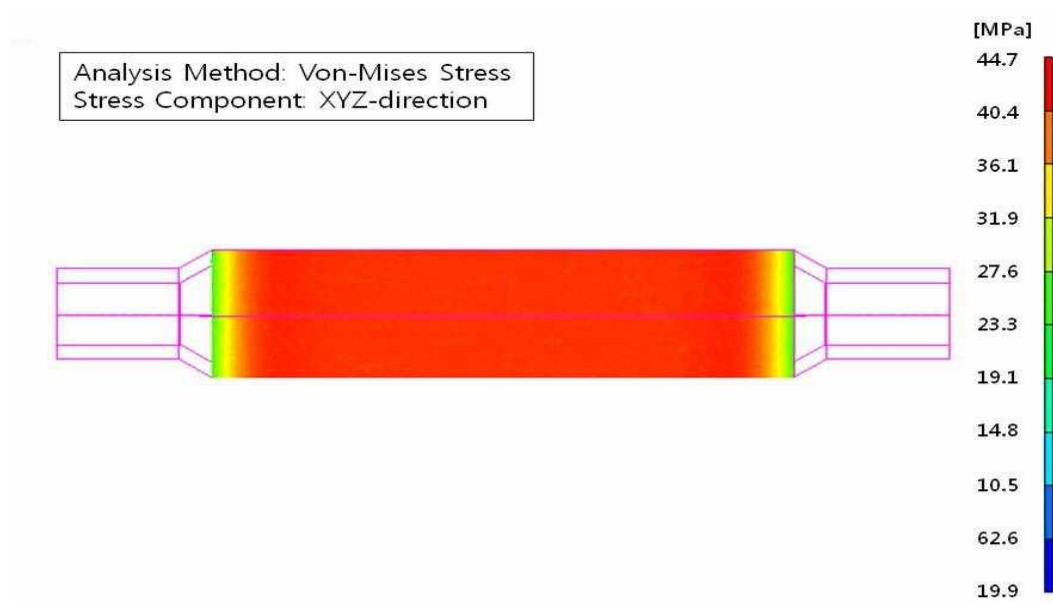


그림 33 . 냉각롤 Shell 개선 전 열응력 분포 정면도

2.4.9. 냉각롤 Shell의 작용응력 및 설계안전계수 계산

가열로 내 냉각롤의 롤 Shell은 내열강으로 구조되었으며, 현재 가열로 분위기 온도에서 소성변형이 발생하지 않으므로, 탄성영역으로 판단할 수 있다.

탄성영역은 비례구간(Linear Area, Proportional Area)이므로, 앞서 계산한 최대굽힘응력과 합으로 계산하면 기계적 하중에 의한 응력과 온도편차에 의해 발생하는 열응력을 고려한 종합적인 응력을 도출할 수 있다.

설계안전계수는 설계에 적합하다고 설정한 기준응력을 기준으로 이보다 낮으면 설계가 안전하지 않은 것으로 판단되고, 이보다 높으면 설계가 안전한 것으로 판단된다. 즉 기준응력을 작용응력으로 나눈 값이 1이상이면 안전한 것이고, 1이하이면 안전하지 않은 설계가 되는 것이다.

안전계수를 구하는 방법과 개념은 이론마다 다르고, 적용상황마다 다른 기준을 사용하고 있는 경우가 있으나, 본 연구에서는 상기 방식을 따른다.

설계기준응력은 앞서 검토한 피로강도와 ASME 설계허용응력의 두 가지 기준으로 검토하였으며, 결과는 아래와 같다.

	굽힘응력 (Test1)	굽힘응력 (Test2)	열응력
작용응력(MPa)	55.4	100.3	44.7

표 25 . 냉각롤 롤 Shell의 응력분석

	Test1	Test2
작용응력(MPa)	100.1	145
안전계수(ASME 기준)	1.03	0.71
안전계수(피로강도)	0.74	0.51

표 26 . 냉각롤 롤 Shell의 종합적인 응력 및 설계안전계수 분석

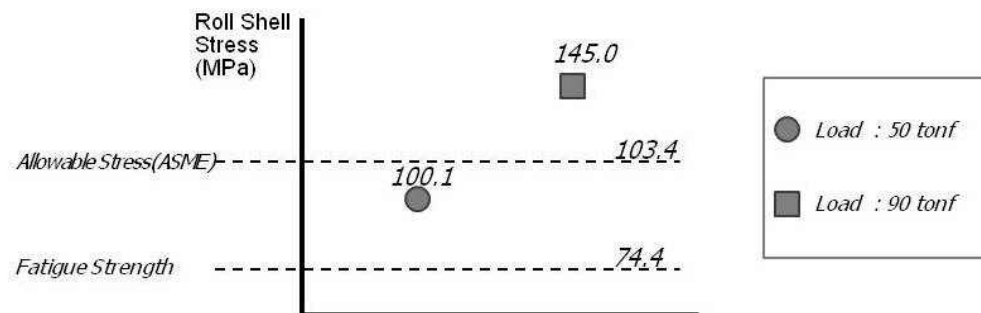


그림 34 . 냉각롤 Shell의 개선 전 종합적인 응력 및 설계안전계수 분석

2.5. 냉각롤 Shell의 고온산화반응 열역학적 분석 [17][18][19]

본 장에서는 냉각롤 Shell이 가지고 있는 또 다른 문제인 고온산화 스케일 발생의 근본원인을 분석한다. 우선 고온산화반응의 발생기구를 분석하고, 다음은 금속의 산화반응에 대해 재료열역학적인 측면에서 접근한다. 재료열역학적 접근에는 산화반응의 깁스자유에너지 분석, 요구되는 산소분압분석, 달톤의 분압법칙에 의한 공기 중 산소분압분석, 엘링검 도표의 Richardson Line을 분석한 온도별 산화반응 요구산소분압 분석이 해당된다. 그 후 Fe-O 2상 상태도를 분석하여 온도에 따라 생성되는 상(Phase)에 대해 살펴보고, 철산화물의 종류인 FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃ 의 종류별 파괴강도를 분석한다. 마지막으로 Fe-O 2상에서의 고온산화가 아닌 실제 롤 Shell 재료인 내열강의 합금성분을 고려하여 열역학 계산프로그램인 FactSage를 이용하여 고온산화 발생원인을 분석한다.

2.5.1. 고온산화반응의 발생기구 분석

금속표면에서 발생하는 고온산화반응은 먼저 금속표면에 산소가 접근하게 되고, 그 후 Oxide의 핵생성(Nucleation)과 성장(Growth)가 발생한다. 이 때 산소가 금속 표면 내부로 녹아들어(dissolution) 가기 시작한다. 그 후 Oxide층이 점차 커지면서 Film의 형태로 층을 이루기 시작하고, 원래 금속 모재와 분리가 되면서 공간이 생기고 이것이 Cavity, Porosity, Microcrack으로 이어진다. 마지막으로 점차 이러한 빈 공간(Free volume) 영역이 증가하면서 Macrocrack으로 발전한다.

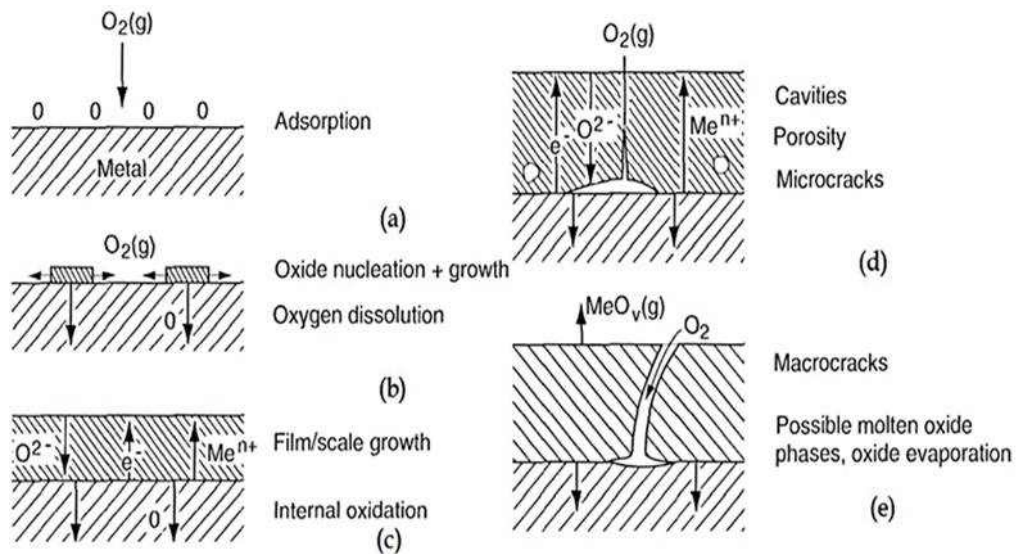
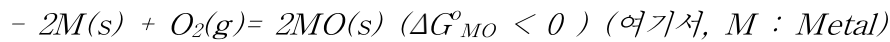


그림 35 . 고온산화반응과정의 모식도

2.5.2. 금속의 산화반응의 깁스자유에너지 분석

일반적으로 금속과 산소와의 반응은 Standard State에서 깁스자유에너지의 차이가 0이하로 열역학적으로 자발적인 반응(Spontaneous reaction)이다. 이 때 평형상수(K)는 아래의 과정에 의해 산소분압에 의해 결정되는데, 산소분압이 늘어날수록 깁스자유에너지는 음의 값으로 작아져, 더욱 자발적인 반응이 발생한다.

[금속의 산화반응의 깁스자유에너지 분석과정]



$$- \Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln K$$

$$- K = a_{MO}^2 / a_M^2 \cdot P_{O_2} \rightarrow K = 1 / P_{O_2}$$

$$- \Delta G = \Delta G^{\circ} - RT \ln P_{O_2}$$

(여기서, ΔG : 시스템 상태에서 변화에 의해 발생하는 깁스자유에너지의 차,

ΔG° : 설정된 Standard State에서의 몰당 깁스자유에너지, a : activity

R : 가스상수, T : 온도(K), K : 평형상수)

2.5.3. 금속의 산화반응에 필요한 산소분압분석

산화반응과 환원반응이 열역학적으로 평형을 이루게 되는 상황에서의 산소분압을 찾는다면 금속의 산화반응에 필요한 산소분압을 알 수 있다. 이는 상기식에서 평형에 의해 ΔG 가 0 이 되면, $\Delta G^\circ = RT \ln P_{O_2}$ 의 상태가 되는 것을 의미한다.

FeO를 포함하여 몇 가지 금속에 대해 고온영역에서 필요한 산소분압을 조사해 보았다. 결과는 다음과 같다.

	Al ₂ O ₃	FeO	NiO
필요산소분압(atm)	10 ⁻⁴⁸	10 ⁻²¹	10 ⁻¹⁶

표 27 . 금속의 산화반응에 필요한 산소분압분석

2.5.4. 달톤의 분압법칙을 활용한 공기 중 산소분압분석

실제 공기 중에 있는 산소의 분압을 달톤의 분압법칙을 이용하여 분석하여 보았고, 이는 FeO 산화반응에 필요한 산소분압에 비해 훨씬 높은 것을 알 수 있었다. 결과는 아래와 같다.

	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Ne
공기의 몰분율	0.78084	0.20947	0.00934	0.000314	0.00001818
	CH ₄	He	Kr	H ₂	Xe
	0.000002	0.00000524	0.00000114	0.00000005	0.000000087

표 28 . 공기 내 산소분압분석

[달톤의 분압법칙을 활용한 공기 중 산소분압분석 과정]

$$P_{O_2} = X_{O_2} \cdot P_{air} = 0.20947 \text{ atm}$$

(by Dalton's Law of partial pressure)

2.5.5. 엘링검 도표를 활용한 온도별 산화반응 요구산소분압 분석

엘링검 도표(Ellingham Diagram)의 Richardson 선도를 이용하여서 온도별 산화반응 요구산소분압을 분석하였다. 가열로의 분위기 온도인 680℃를 고려하여 600℃에서 700℃까지의 필요산소분압을 분석한 결과 실제 공기 중의 산소분압에 비하여 훨씬 낮음을 알 수 있었다.

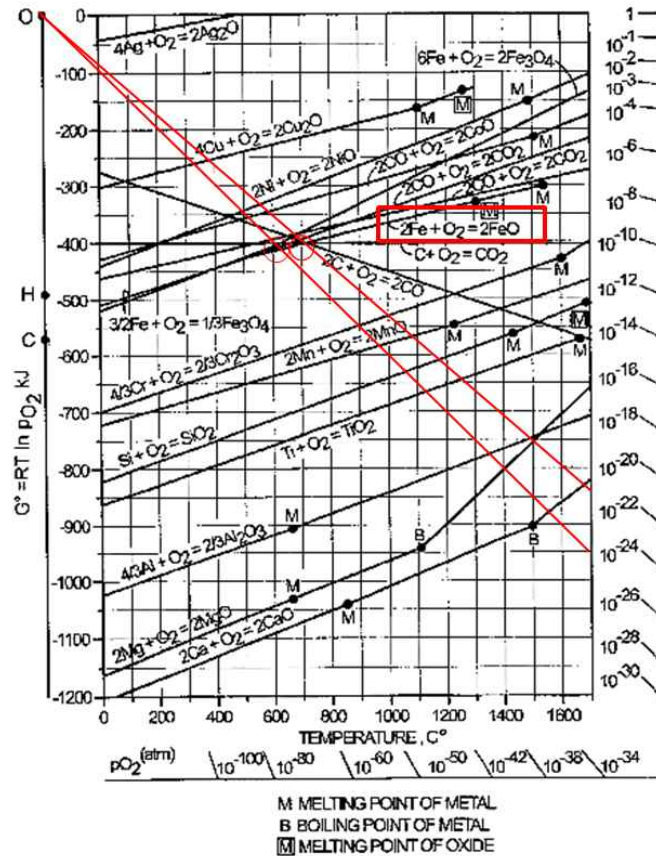


그림 36 . 엘링검 도표를 활용한 온도별 산화반응 요구산소분압 분석

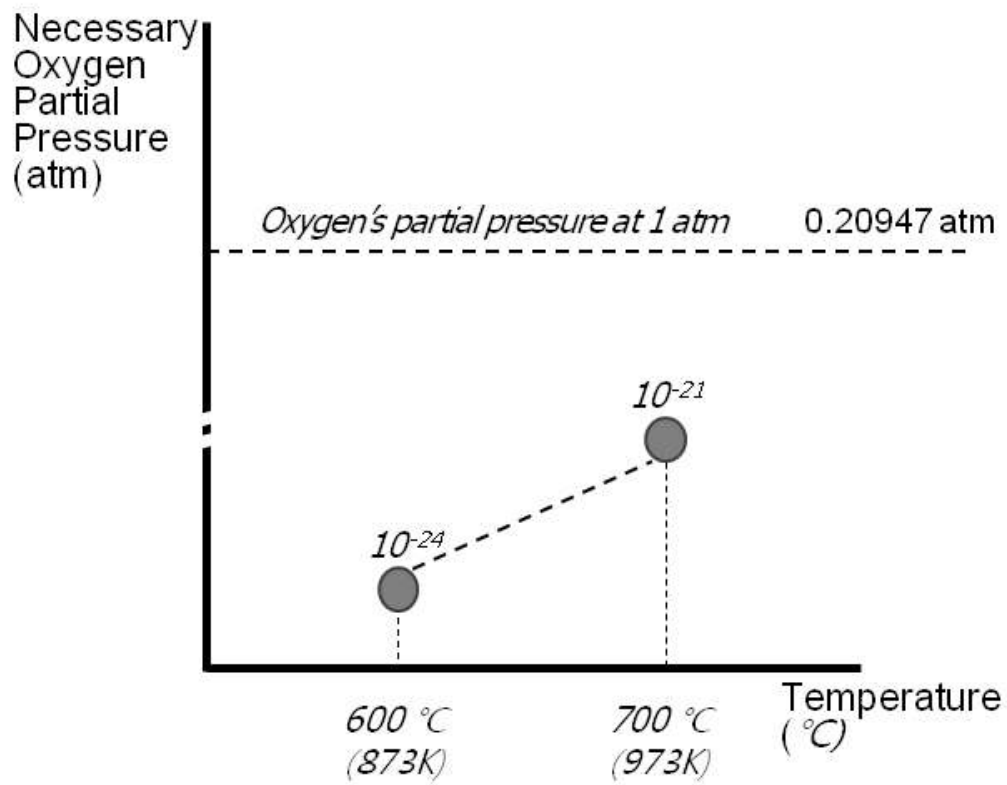


그림 37 . 온도별 산화반응 요구산소분압 및 공기 중 산소분압 분석

2.5.6. Fe-O 2상 상태도 분석

Fe-O를 2상 상태도(Binary System Phase Diagram)을 분석하면, 580도 이상의 고온에서 FeO(Wüstite) 상이 급격히 발생함을 알 수 있다.

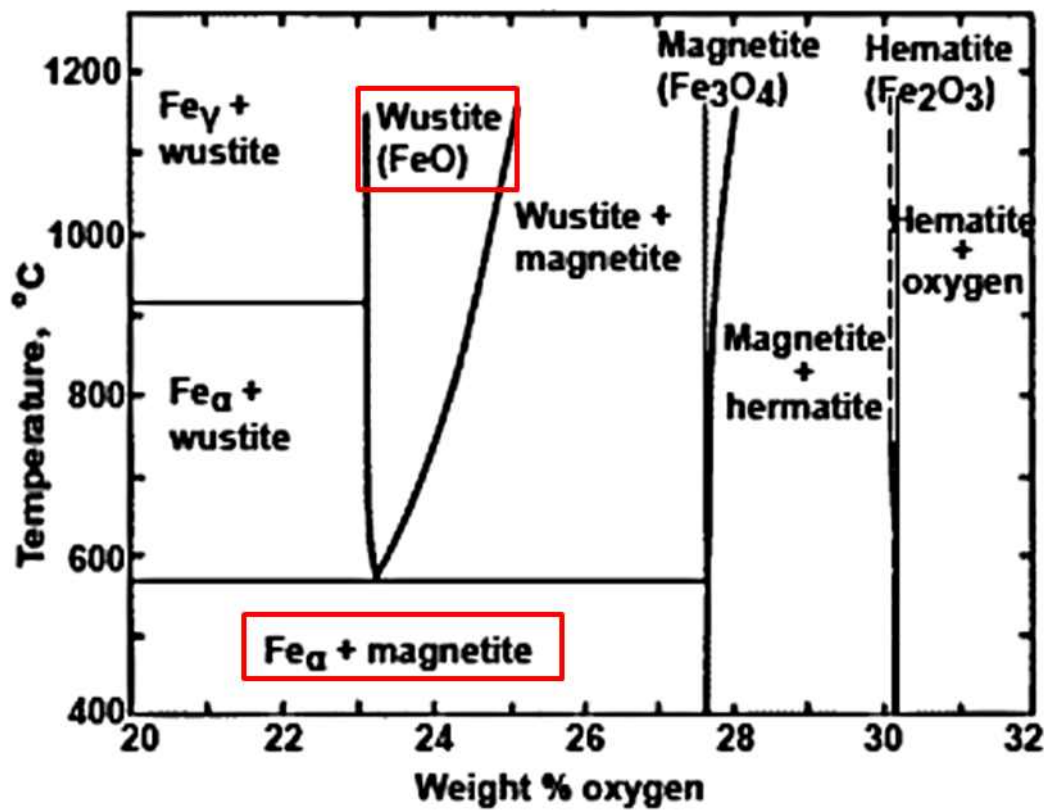


그림 38 . Fe-O 상태도 분석

2.5.7. 철산화물 종류별 파괴강도 분석

고온영역에서 발생하기 쉬운 FeO(Wüstite)의 산화스케일에 대해서 다른 산화스케일인 Fe₃O₄(Magnetite)와 Fe₂O₃(Hematite)와 함께 파괴강도를 분석하였고, 결과적으로 FeO가 Fe₃O₄에 비해 10배 이상 강도가 약하고, 취성(Brittleness)의 성질을 가지고 있음을 알 수 있었다.

스케일종류	파괴강도(kgf/mm ² , 상온)	비고
FeO(Wüstite)	0.4	강한 취성
Fe ₃ O ₄ (Magnetite)	4.0	-
Fe ₂ O ₃ (Hematite)	1.0	-

표 29 . 냉각롤 수냉파이프 유입, 토출 온도 측정결과

2.5.8. FactSage를 활용한 Shell의 합금강 성분 온도별 산화반응 분석

냉각롤 롤 Shell에 사용된 실제 내열강의 합금성분을 바탕으로 온도별 FeO 산화스케일 발생을 분석하였다. 결과는 아래와 같다.

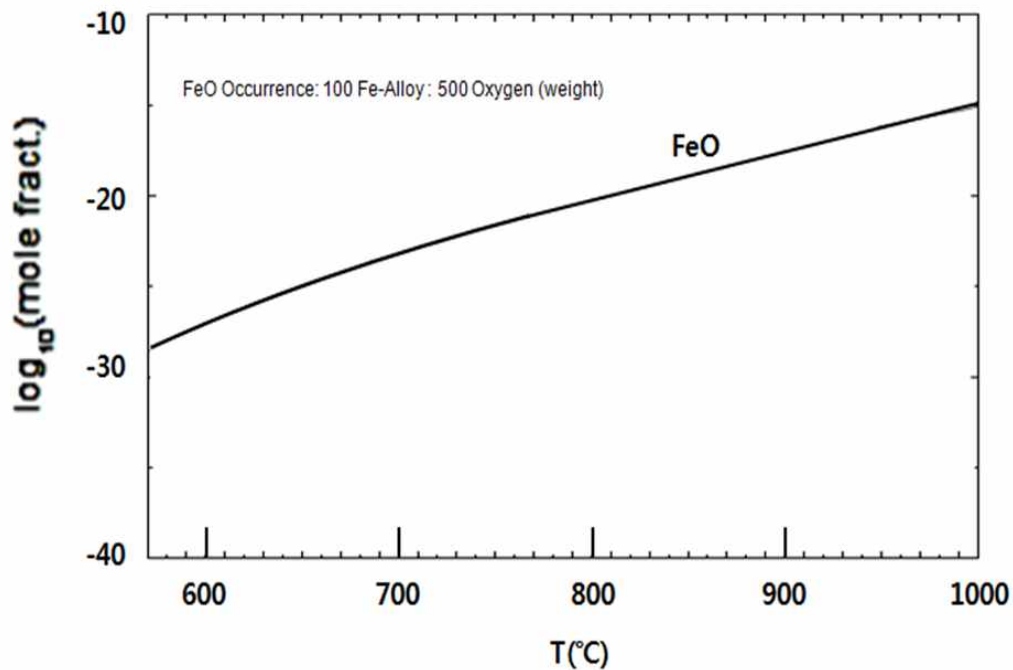


그림 39 . 내열강 합금성분의 FeO 생성 FactSage 분석

2.5.9. 냉각롤 Shell 표면 고온산화 주요원인 분석

결과적으로 고온영역에서 산화스케일의 발생의 근본원인은 산소분압의 차이가 아니며, 온도상승에 따른 차이임을 알 수 있었다. 이를 통하여 롤 Shell 표면의 온도를 낮추어 주는 것이 산화스케일의 발생저감에 효과적임을 예측할 수 있었다.

2.6. TRIZ를 활용한 경제적 해결안 분석[20][21]

상기 연구과정에 의해 현재 냉각롤 롤 Shell이 가지고 있는 문제점인 균열과 산화스케일 발생의 근본원인은 높은 온도임을 알 수 있었다. 본 장에서는 TRIZ기법을 활용하여 경제적으로 부담없는 수준에서 철강산업에 실제 적용할 수 있는 해결안을 분석하고자 한다.

2.6.1. Su-Field 모델 분석

현재 시스템의 문제를 다음과 같이 Su-Field 모델을 통해 분석한다. Su는 Substance를 의미하고, Field는 본 연구에서는 열장(Thermal Field)를 적용하였다.

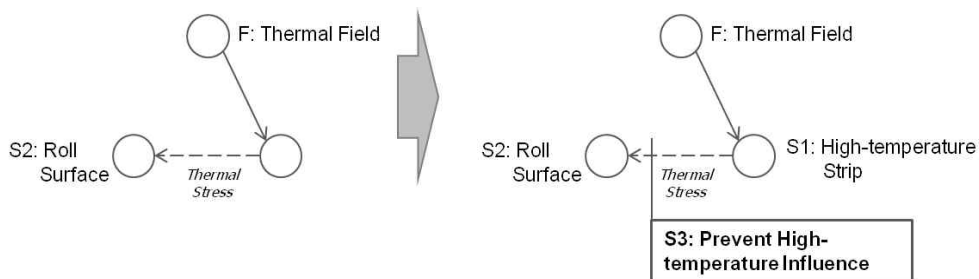


그림 40 . Su-Field 분석

2.6.2. TRIZ 모순 매트릭스 분석

트리즈 모순 매트릭스를 분석하였다. 악화되는 특징(Worsening Feature)는 응력(Stress)와 온도(Temperature)가 도출되었고, 개선되는 특징(Improving Feature)는 제조의 편의성(Ease of Manufacture)와 생산성(Productivity)가 도출되었다.

개선 \ 악화	11. 응력	17. 온도
32. 제조의 편의성	35. 19. 1. 37	27. 26. 18
39. 생산성	10. 37. 14	35. 21. 28. 10

표 30 . TRIZ 모순 매트릭스 분석

2.6.3. TRIZ 40가지 원리 분석

트리즈의 40가지 발명원리 중 2.6.2에서 도출된 발명안을 분석하여 보았다.

결과는 다음과 같다.

번호	원리	분석결과
1	분리(Segmentation)	롤 Shell 분리불가
10	선행작용(Preliminary Action)	적용가능(O)
14	구상화(Spheriodality)	이미 롤 Shell 곡면있음
18	기계적 진동(Mechanical Vibration)	스트립 품질에 영향
19	주기적 작용(Periodic Action)	적용가능(O)
21	건너뛰기(Skipping)	생략 불가 공정
26	복사하기(Copying)	추가비용
27	싼 물건으로 교체(Cheap short-living)	저렴한 교체재 없음
28	기계적 대체(Mechanics Substitution)	추가비용
35	변수변화(Parameter Change)	기계적성질 변경불가
37	열적팽창(Thermal Expansion)	새로운 설비도입 필요

표 31 . TRIZ 40가지 원리 분석

2.6.4. TRIZ 자원분석 및 IFR 도출

TRIZ 자원 분석을 통해 주변에서 쉽게 얻을 수 있고, 저렴하면서도 적용이 쉬운 자원으로 공기사용을 도출하였다. 이는 IFR의 개념에서도 매우 유용한 자원인데, IFR은 Ideal Final Result를 의미하며, Effectiveness(효과)를 Cost (투자비용)으로 나눈 값에 비례한다. 공기는 사용비용이 적고 냉각물 물 Shell의 표면냉각효과도 가져올 수 있어 사용자원으로 채택되었다.

No.	Principles		Item	Review	Possibility
10	Preliminary action (surface-cooling)		Water	<i>Thermal Shock, Extra Pump and Pipe</i>	<i>None</i>
			N2	<i>Extra Storage</i>	<i>None</i>
19	Periodic action (surface-cooling)		Ar	<i>High-Price, Extra Storage</i>	<i>None</i>
			Air	Cheap-Price(almost free)	Adopted

※IFR: Ideal Final Result = Effectiveness / Cost

그림 41 . TRIZ 자원분석 및 IFR 도출

2.6.5. 냉각롤의 고질적 문제해결을 위한 TRIZ해결안 도출

상기 서술된 바와 같이 채택된 공기는 공기노즐(Air Nozzle)을 이용하여 냉각롤 롤 Shell이 피압연물에 압하중을 받기 바로 직전에 공기로 냉각시켜 주어, 온도를 낮추어 주기로 하였다. 따라서 전체응력은 기계적응력과 열응력인데, 기계적응력을 집중적으로 받는 압하시 재질에 가해지는 열응력만큼의 부하를 줄여주어, 전체적으로 받는 롤 Shell 응력도 줄어들게 될 것이라 판단하였다. 또한 적정 압하중을 분석하여 생산공정에 압하중이 50tonf 만으로도 충분하다는 것을 알게 되어, 압하중을 조정하였다.

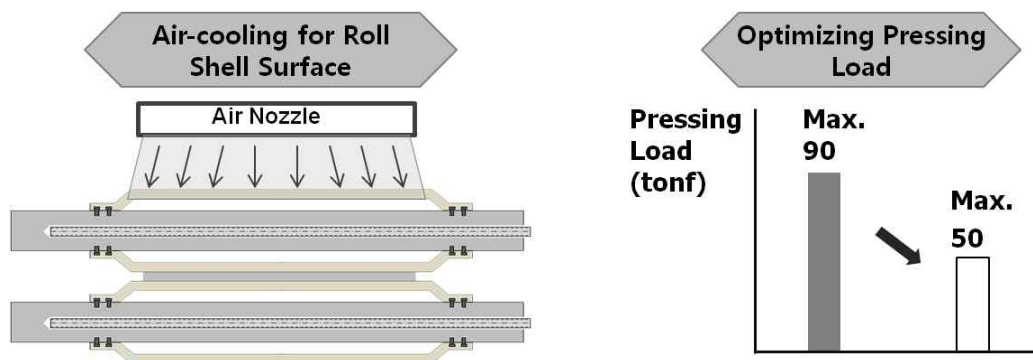


그림 42 . 냉각롤의 고질적 문제해결을 위한 해결안 도출

3. 결과 및 토의

3.1. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 기계적 응력과 열응력 분석결과

냉각롤 개선 전·후 Shell의 기계적 응력과 열응력 계산결과를 분석하고자 한다.

3.1.1. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 최대굽입응력 계산결과

	개선 전	개선 후
최대적용하중	90 tonf	50 tonf
최대굽입응력	100.3 MPa	55.4 MPa

표 32 . 냉각롤 개선 전·후 Shell의 최대굽입응력 계산결과

3.1.2. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 열응력 계산결과

	개선 전	개선 후
롤 Shell 내·외표면온도차	26.74℃	6.74℃
평균열응력	44.7 MPa	11.3 MPa

표 33 . 냉각롤 개선 전·후 Shell의 열응력 계산결과

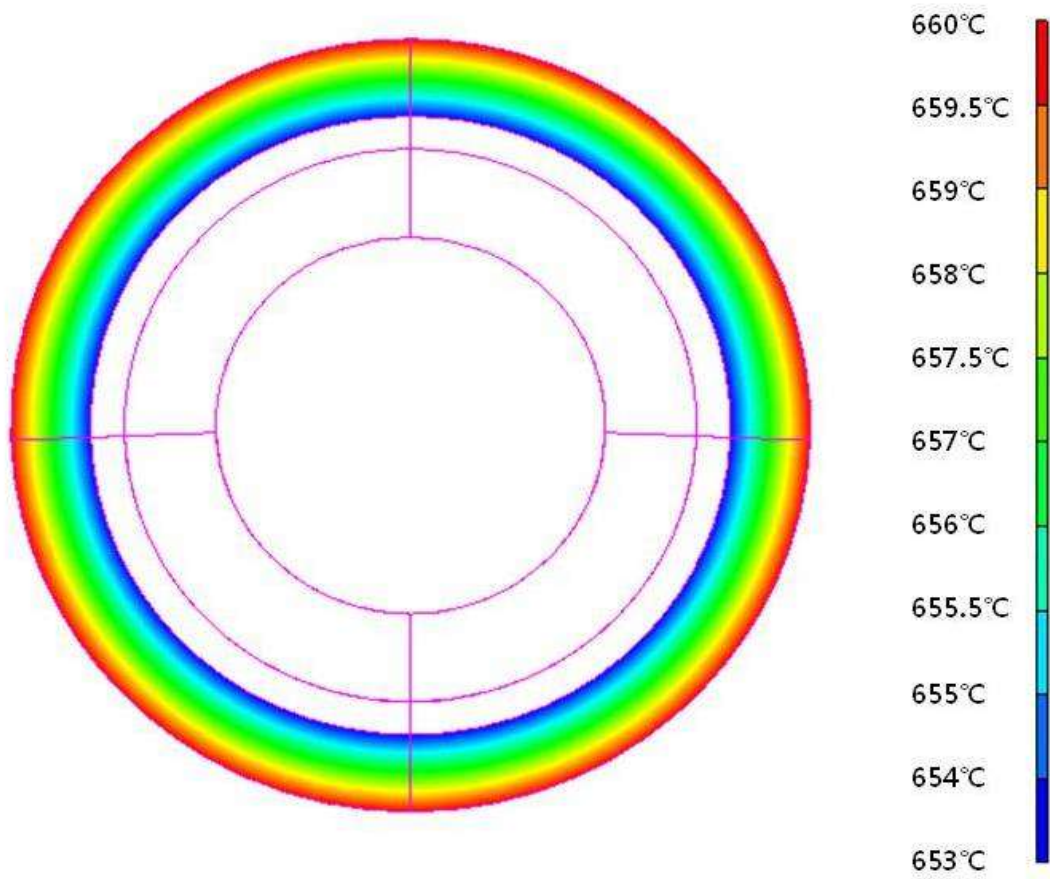


그림 43 . 냉각롤 Shell 개선 후 온도 분포 단면도

Analysis Method: Von-Mises Stress
Stress Component: XYZ-direction

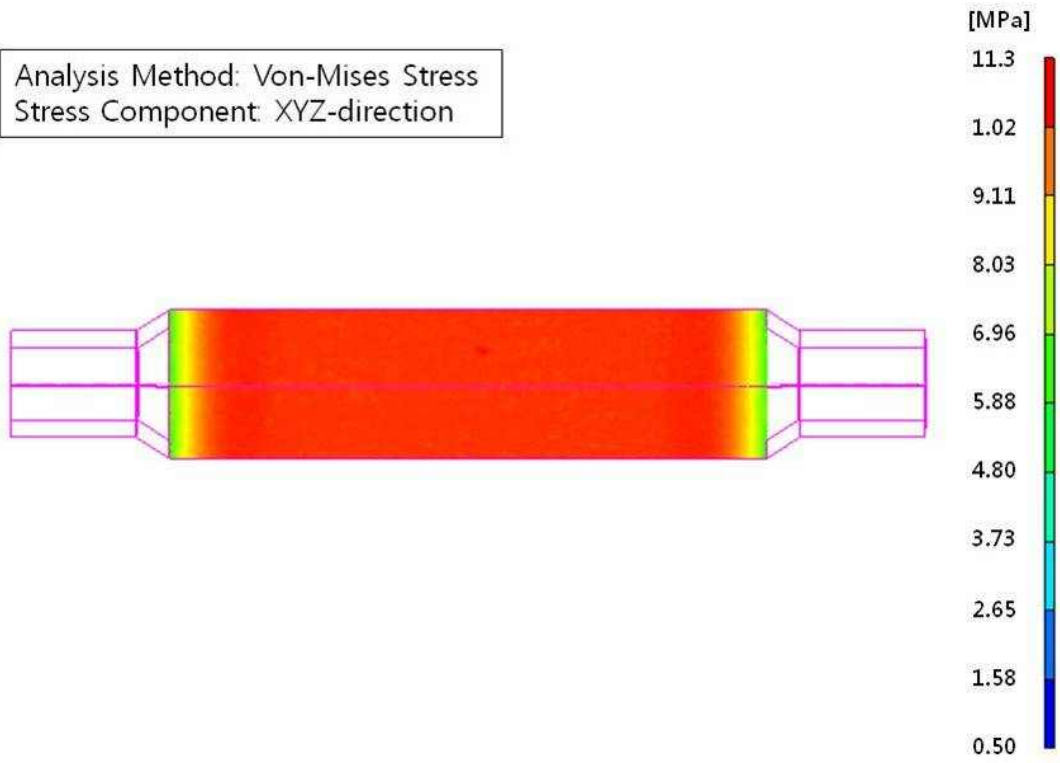


그림 44 . 냉각롤 Shell 개선 후 열응력 분포 정면도

3.1.3. 냉각률 개선 전·후 Shell의 작용응력 계산결과 도출 및 토의

최대굽힘응력과 최대열응력을 고려하여 개선 전과 후의 최대작용응력을 도출하였다. 적정압하력 조절과 에어노즐을 활용한 롤 Shell 표면의 공기냉각과정이 작용응력저감에 효과적임을 알 수 있었다.

	개선 전	개선 후
최대굽힘응력	100.3 MPa	55.4 MPa
평균열응력	44.7 MPa	11.3 MPa
최대작용응력	145.0 MPa	66.7 MPa

표 34 . 냉각률 개선 전·후 Shell의 작용응력 계산결과

3.2. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 설계안전계수 분석결과

3.2.1. 냉각롤 Shell 재료의 피로강도 계산결과

수정계수를 고려한 피로강도 계산식을 이용하여 냉각롤 롤 Shell 재질인 내열강의 경우 680℃기준 74.42 MPa, 660℃기준 78.95 MPa이 도출되었다.

3.2.2. 냉각롤 Shell 재료의 설계허용강도 계산결과

ASME에서 제안한 설계코드를 바탕으로 설계허용응력을 계산한 결과 680℃ 기준 98.81 MPa, 660℃ 기준 103.4 MPa을 설계허용응력으로 도출할 수 있었다.

3.2.3. 냉각롤 개선 전·후 Shell의 설계안전계수 분석결과 도출 및 토의
개선 후 개선 전에 비하여 피로강도 및 설계허용강도 기준 안전계수가 2배 이상 증가하였으며, 모두 1이상으로 적절한 설계라고 할 수 있다.

	개선 전	개선 후
최대작용응력	145.0 MPa	66.7 MPa
피로강도 기준 안전계수	0.51	1.15
설계허용강도 기준 안전계수	0.71	1.50

표 35 . 냉각롤 개선 전·후 Shell의 설계안전계수 분석결과

3.3. 냉각롤 개선 전·후 Shell 표면 파단 발생결과 및 토의

본 연구내용을 토대로 실제 생산 중인 공정에 개선안을 적용한 결과 16개월간의 테스트 기간 동안 기존에 자주 발생하던 롤 Shell 표면의 균열(Crack) 및 파단은 발생하지 않았다.

3.4. 냉각롤 개선 전·후 Shell 표면 고온산화 발생결과 및 토의

또한 같은 기간 동안 기존에 자주 발생하던 롤 Shell 표면의 고온산화스케일 역시 발생하지 않았다. 이를 통하여 Air Nozzle을 통한 공기분사냉각방식이 효과적임이 검증되었다.

3.5. 냉각롤에서 기계적 응력 및 열응력을 고려한 일반식 도출

본 연구과정에서 부분별로 분석하였던 내용을 종합하면 고온의 로(Furnace)에서 작동하는 냉각롤의 최대응력을 도출하는 식을 유도할 수 있다. 이 일반식은 냉각롤에 작용하는 기계적 응력과 열응력을 모두 고려한 것이다.

- ① 롤의 베어링 간격을 $L(\text{mm})$ 이라고 한다. 베어링 위치는 지지점에 해당된다.
- ② 압하되는 길이를 $W(\text{mm})$ 라고 한다. 압하되는 피압연물은 통상 좌우대칭이 이루어 지며, 본 일반식에서도 이러한 좌우대칭(Symmetric)이 유지된 하중작용을 가정한다. 또한 분포하중일 경우, 골고루 하중이 분산되는 것으로 가정한다.
- ③ Load Cell에서 측정된 하중을 $P(\text{Newton, N})$ 라고 한다. 이는 베어링 측에서 측정되어 집중하중으로 인식되지만, 반작용력에 의해 분포하중으로 냉각롤 표면에 전달될 것이다.
- ④ 최대굽힘모멘트는 2.2장에서 서술한 원리와 같이, 다음의 식이 도출된다.

$$\text{Maximum Moment} = \frac{P}{2} \times \left(\frac{L}{2} - \frac{W}{2} \right) + \frac{1}{2} \times \frac{P}{2} \times \frac{W}{2}$$

⑤ 냉각물의 단면계수(Sectional Modulus, Z)를 고려해준다. 여기서 D는 외경(mm), d는 내경(mm)으로 한다.

[중공축 단면계수 계산식]

$$Section\ Modulus(Z) = \pi \times (D^4 - d^4) / 32D$$

⑥ 최대굽힘응력은 최대굽힘모멘트를 단면계수로 나누어 준 값이므로 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{Max\ Bending} = \frac{32 \times D \times [\frac{P}{2} \times (\frac{L}{2} - \frac{W}{2}) + \frac{1}{2} \times \frac{P}{2} \times \frac{W}{2}]}{\pi \times (D^4 - d^4)}$$

⑦ 냉각물 Shell 내부, 외부 표면의 온도차를 일단 ΔT 라고 한다. 실질적으로 냉각물 내부 표면의 온도차는 구할 수 없으므로, 나중에 별도의 과정이 필요하다. 연구결과를 토대로 추세선을 분석하면, 열응력(MPa)은 $1.67\Delta T$ 의 식을 나타낸다. 이 때 ΔT 가 0일 때는 열응력도 발생하지 않으므로 0이다. 또한 개선한 영역의 온도차와 열응력 관계는 본 식에 적용할 수 없는데 그 이유는 물 Shell 표면전체의 온도를 낮춘 것이 아니고, 트리즈의 OT(Operation Time) 및 OZ(Operation Zone)의 원리를 이용하여 가장 많은 작용하중을 받는 표면과 시간에 맞추어 국부적인 구간에 냉각을 하였기 때문이다. 추가적으로 서술하면 물은 계속 회전하기 때문에 에어노즐이 같은 위치로 분사되면, 물 표면의 입장에서 OT(Operation Time)는 자동으로 해결된다.

⑧ 열응력은 곡면, 구속정도에 따라 많이 변화한다. 같은 온도차라고 하더라도 열응력이 적게 발생하면 잘 된 설계이고, 열응력이 많이 발생하면 상대적으로 부족한 설계라고 할 수 있다. 본 연구를 기준으로 설계지수(Design Factor, f_D)를 1로 설정하고, 열응력이 덜 받게 설계된 경우 1이상, 그 반대의 경우를 1이하로 나타낸다. 따라서 열응력(MPa)은 $1.67\Delta T / f_D$ 로 표현할 수 있다.

⑨ 냉각물에 유입시키는 유입온도를 T_{in} , 토출온도를 T_{out} 이라고 한다. 통상 냉각물의 사용되는 용수는 20℃에서 30℃사이인 점을 고려하여 비열은 4.2 KJ/Kg-K로 설정한다. 사용되는 유량(Flow Rate)는 Q라고 하고 실제 공정에서 가장 많이 사용되는 단위인 m^3/hr 로 설정하면 Mass Flow(kg/s)는

$Q / 3600 \times [1,000 - 0.0178 \times \text{abs}\{(T_{in}+T_{out})/2 - 4^\circ C\}^{1.7}]$ 이 되고

Heat Flux(KJ/s)는 $4.2 \times Q / 3600 \times [1,000 - 0.0178 \times \text{abs}\{(T_{in}+T_{out})/2 - 4^\circ C\}^{1.7}] \times (T_{out}-T_{in})$ 이 된다.

⑩ 냉각물 Shell 표면의 경우 열화상카메라 등으로 측정이 가능한데, 이 때의 온도를 T_s 라고 한다. 또한 냉각물에 감기는 Wrapping 각을 θ (단위 $^\circ$) 라고 하면, 냉각물 Shell 내부온도는 다음과 같이 된다. 여기서 K_{shell} 은 냉각물 Shell의 해당온도 열전달계수(단위: W/m-k)가 된다.

$$T_s - \left[4.2 \times \frac{Q}{3600} \times (1,000 - 0.0178 \times \text{abs}((T_{in} + T_{out})/2 - 4)^{1.7}) \right. \\ \left. \times (T_{out} - T_{in}) \times \frac{(D-d)}{2} / (K_{shell} \times D \times \pi \times W \times \theta / 360) \right]$$

본 식을 종합하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\sigma_{\max(total)} [MPa] = \frac{4DP(2L-W)}{\pi(D^4-d^4)} + 0.41 \times \frac{Q(T_{out} - T_{in})(D-d)}{(\pi K_{shell} D W \theta f_D)} \times [1000 - 0.0178 \times (\frac{T_{in} + T_{out}}{2} - 4)^{1.7}]$$

또한 물의 밀도를 1000 kg/m³으로 온도에 따른 차이를 무시하면 다음과 같이 식이 간략화된다.

$$\sigma_{\max(total)} = \frac{4DP(2L-W)}{\pi(D^4-d^4)} + 410 \times \frac{Q(T_{out} - T_{in})(D-d)}{(\pi K_{shell} D W \theta f_D)} \quad [MPa]$$

$$\text{Bending Stress Term: } \frac{4DP(2L-W)}{\pi(D^4-d^4)}$$

$$\text{Thermal Stress Term: } 410 \times \frac{Q(T_{out} - T_{in})(D-d)}{(\pi K_{shell} D W \theta f_D)}$$

(여기서 $\sigma_{\max(total)}$ 은 기계적 응력과 열응력을 고려한 작동응력(MPa),

D는 롤 셸 외경(mm), d는 롤 셸 내경(mm), P는 Load Cell 측정하중(N),

L은 냉각롤 베어링 간격(mm), W는 냉각롤 표면에 피압하물 접촉길이(mm),

Q는 냉각롤 수냉파이프 통과유량(m³/hr), T_{in}은 수냉파이프 유입온도(°C),

T_{out}은 수냉파이프 토출온도(°C), K_{shell}은 해당온도의 냉각롤 롤 셸 재료의 열

전달률($W/m-k$), θ 는 Wrapping Angle($^{\circ}$), f_D 는 설계지수, 설계지수는 1을 기준으로 하며 높을수록 같은 온도차에서 열응력이 적게 발생하는 좋은 설계임)

다음과 같은 일반식을 통해 측정된 변수들을 적용하여 기계적 응력과 열응력을 고려한 가열로 내 냉각물의 최대작용응력을 계산할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 철강공정 중 가열로 내부에 있는 수냉식 냉각롤의 구조와 원리를 이해하고, 냉각롤 롤 Shell 표면에 발생하는 문제점인 균열과 산화물생성 현상을 분석하였다.
2. 냉각롤 각 부위의 재료를 조사하고 재료의 기계적, 열적특성을 분석하였다.
3. 재료의 기계적 거동과 재료역학의 원리를 이용하여 냉각롤에 작용하는 응력상태(Stress-State)를 분석하였다.
4. 피로역학과 기계설계의 원리를 이용하여 냉각롤 Shell의 피로강도 및 설계허용응력을 계산하였다.
5. 열전달 및 물질전달, 유체역학, FEM을 활용하여 냉각롤의 구간별 온도분포를 찾고, 열응력 분석을 실행하였다.
6. 재료열역학 및 고온산화의 원리를 이용하여 냉각롤 Shell에서 발생하는 산화스케일의 원인을 연구하고, 강도학적으로 미치는 영향을 분석하였다.

7. 창의적 발명원리인 TRIZ 원리를 활용하여 경제성을 갖춘 해결안을 도출하였으며, 실제 생산현장에 적용하여 기존의 문제를 해결하였다.
8. 본 연구에서 논의된 이론을 바탕으로 냉각물 Shell에 작용하는 최대응력에 관하여 일반식을 도출하였다. 연구대상의 측정치만 입력하면 최대작용응력 계산이 가능하도록 하여 유사 연구에 쉽게 활용할 수 있도록 하였다.

참고 문헌

- [1] AISI(American Iron and Steel Institute) High-temperature Property Data, Ferrous Alloys
- [2] 標準機械設計圖表便覽, 小栗富士雄著
- [3] Mechanics of Materials, Roy R. Craig, JR. John Wiley & Sons, P229~257
- [4] Mechanical Behavior of Materials, 4th Ed, Norman E. Dowling, Pearson, P 172~215
- [5] Mechanical Metallurgy SI Metric Edition, George E. Dieter, McGrawHill
- [6] Mechanical Design, theory and practice, Hong Jang-Pyo, Kyobobooks
- [7] Allowable Working Stress, C.J.Noll and C.Lipson, Society of Experimental Stress Analysis, Vol3, No.2
- [8] Mechanical Engineering Design, J.E.Shigley, C.R.Mischke and R.G.Budynas, 7th ed. McGraw-Hill.
- [9] Probablistic Design, Machine Design, Vol47, E.B.Haugen and P.H.Wirsching
- [10] A Relation Between Theorical Stress-concentration Factor and Fatigue Notch Facture Deduced from the Concept of Highly Stressed Volume, R.Kugel, Proc. ASTM, 61

- [11] ASME boiler and pressure vessel code. Section VIII, Rules for construction of pressure vessels. Division 1-2, ASME Press
- [12] Fundamental of Heat and Mass Transfer, Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 5th ed, Wiley
- [13] Fluid Mechanics, Frank M. White, 6th ed, McGrawHill
- [14] An Introduction to Transport Phenomena in Materials Engineering, David R. Gaskell, Purdue University
- [15] Prandtl Number, Reynolds Number 원자력용어사전, 2011
- [16] Nusselt Number, 두산백과사전
- [17] Introduction to the Thermodynamics of Materials, David.R. Gaskell, 5th ed. Taylor & Francis
- [18] High Temperature Corrosion in metallic superfcies, P. Kofstad. ed. Elsevier
- [19] Introduction to the High-temperature Oxidation of Metals, Neil Birks, General H.Meier, and Frederick S.Pettit. 2nd ed. Cambridge
- [20] TRIZ, Nikolay Shpakovsky, Elena Nviskaya, Dooyang
- [21] TRIZ, the theory of inventive problem solving, Genrich Altshuller, Technical Innovation Center

abstract

In this study, we aim to develop general equation for water-cooling roll surface maximum stress in high-temperature space considering mechanical stress and thermal stress. To achieve this general equation, we research about mechanical behavior of materials and high-temperature oxidation in terms of thermodynamics of materials for water-cooling roll in high-temperature furnace.

The first part of this study is mechanical behavior analysis of materials. we do calculations about fluid dynamics and heat and mass transfer principles considering furnace's high-temperature atmosphere and temperature difference between inlet and outlet cooling water in water-cooling line. And we also research materials' mechanical and thermal properties and calculate mechanical and thermal stress. In this part, firstly, we research three different materials' various properties depending on temperature. After this process, we analyze stress-transient area and support point in roll's structure and measure load value using load-cell. Through this step, we present SFD(Shear Force Diagram) and BMD(Bending Moment Diagram) and maximum bending stress considering section modulus. And then, we calculate fatigue strength and allowable design stress using ASME(American Society of Mechanical Engineers) design code. Finally, we analyze furnace

atmosphere temperature profile and roll shell temperature using thermo-vision and measure inlet and outlet temperature and flow rate of cooling water using sensors. Base on these measured value, we analyze temperature profile in water-cooling roll's structure considering heat flux, Prandtl number, Sutherland equation, Reynolds number, Nusselt number, thermal Resistance, thermal conductivity, Fourier law. And from this temperature profile, we can achieve thermal stress using FEM(Finite Element Method). Through all these process, we find maximum stress on roll shell and safety factor.

Second part of this study is about thermodynamics and high-temperature oxidation phenomena. Firstly, we research about high-temperature oxidation mechanism and Gibbs free energy for oxidation depending on oxygen partial pressure. To find oxygen partial pressure requirement for oxidation($2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$), we use Richardson line in Ellingham Diagram. To consider ferro-alloy's chemical composition for heat-resistant steel which is used in roll shell part, we do analysis using FactSage program. Then, we analyze Fe-O binary system phase diagram and achieve temperature-dependent oxide-phase. Lastly, we compare fracture strength for different type of oxide scale(FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3).

Third Part of this study is about TRIZ(Teoriya Resheniya Izobretatelskikh

Zadatch, Theory of Inventive Problem Solving). we use TRIZ principles and achieve economically feasible solutions and adjust this concept to real operation situation. And we analyze this result.

The last part of this study is achieving general equation for water-cooling roll maximum stress expecting that some researchers who have similar problems can easily analyze the maximum stress using only measured values for their own water-cooling roll situation.

**keywords : Water-cooling roll, Mechanical behavior of materials,
Stress calculation, Thermodynamics of materials,
High-temperature oxidation, TRIZ**

student number : 2010-23195